

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Ústav letecké dopravy

Návrh řízení UAV s elektropohonem

Design of UAV – Electric Propulsion Control

Student:

Dariusz Cymerys

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. František Martinec, CSc.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání bakalářské práce

Student: **Dariusz Cymerys**
Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy
Studijní obor: 3708R038 Technologie údržby letecké techniky
Téma: **Návrh řízení UAV s elektropohonem**
Design of UAV - Electric Propulsion Control

Zásady pro vypracování:

1. Analýza řídicího systému pro použití na UAV s kolovým startem
2. Návrh a výběr řídicího systému pro UAV s elektropohonem
3. Návrh a částečná realizace řídicího systému

BP musí v rámci úvodu obsahovat kapitolu se stanovením cílů práce a v závěru zhodnocení dosažených cílů.

Seznam doporučené odborné literatury:

Blažek, J.: Úvod do teorie systémů automatického řízení a regulace. Košice. 1984.
<http://www.sciencedirect.com/science>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Martinec, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.5.2011


.....
Podpis

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít
- (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Dariusz Cymerys

Adresa trvalého bydliště autora práce: č.p. 382, 739 56 Ropice

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

CYMERYS, D. *Návrh řízení UAV s elektropohonem: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2011. 59 s. Vedoucí práce: Martinec, F.

Bakalářská práce se zabývá analýzou a návrhem řídicích systémů pro použití na bezpilotním létajícím prostředku s kolmým startem. V první části jsou popsány jednotlivé prvky nutné pro zajištění ovládání bezpilotního prostředku. Zvláštní důraz je kladen na přehled stabilizačních systémů. Dále je provedena analýza a výběr možných způsobů ovládání s přihlédnutím k současným trendům a také analýza a výběr jednotlivých prvků zajišťujících řízení letu. V poslední části je popsán kompletní systém řízení a jsou popsány možnosti použití telemetrie. Použitelnost navrhovaného řešení je podložena částečnou realizací.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

CYMERYS, D. *Design of UAV – Electric Propulsion Control: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2011, 59 p. Thesis head: Martinec, F.

Bachelor thesis is dealing with analysis and design of control systems for Unmanned Aerial Vehicle with Vertical Take-off and Landing characteristics. Components used for operating are described in the first part of thesis. Special emphasis is placed on stabilization systems which are important for this kind of facility. Next there is analysis and selection of contemporary control possibilities, then analysis and selection of optimal components for designed UAV. Following chapter describes complete control system and possibilities of telemetry application. Partial implementation is evidence of design accuracy.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	7
0 CÍL PRÁCE	8
ÚVOD	9
1 PRVKY ŘÍDICÍHO SYSTÉMU.....	10
1.1 VYSÍLACÍ ČÁST	10
1.2 PŘIJÍMACÍ ČÁST	13
1.3 SERVOMOTORY	13
1.4 PRVKY PRO STABILIZACI	16
1.4.1 Gyroskopy.....	16
1.4.2 Akcelerometry.....	18
1.4.3 Stabilizace pomocí snímání rozdílů teplot na horizontu.....	21
1.5 NAPÁJENÍ PALUBNÍ ELEKTRONIKY	21
2 ANALÝZA A VÝBĚR ŘÍDICÍHO SYSTÉMU PRO UAV S ELEKTROPOHONEM	23
2.1 OVLÁDÁNÍ V REŽIMU SVISLÉHO LETU	23
2.2 OVLÁDÁNÍ V REŽIMU VODOROVNÉHO LETU	29
2.3 NÁVRH ŘÍDICÍ JEDNOTKY	30
2.4 NÁVRH VYSÍLACÍ A PŘIJÍMACÍ ČÁSTI.....	32
2.5 NÁVRH SYSTÉMU STABILIZACE	34
2.6 NÁVRH SERVOMOTORŮ	36
2.7 NÁVRH NAPÁJENÍ PALUBNÍ ELEKTRONIKY	38
3 NÁVRH A ČÁSTEČNÁ REALIZACE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU.....	41
3.1 NÁVRH SESTAVENÍ SYSTÉMU ŘÍZENÍ LETU	41
3.2 NÁVRH SYSTÉMU TELEMETRIE	44
3.3 ČÁSTEČNÁ REALIZACE	48
3.3.1 Použité prvky	48
3.3.2 Sestavení systému řízení	49
3.3.3 Postup realizace	51
4 ZÁVĚR.....	56
4.1 ZHODNOCENÍ CÍLŮ	56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Anglický výraz	Český výraz
AM	Amplitude Modulation	Amplitudová modulace
AVCS	Active Angular Velocity Control System	Aktivní systém řízení úhlové rychlosti
BEC	Battery Elimination Circuit	
CCPM	Cyclic/collective Pitch Mixing	
CVG	Coriolis Vibratory Gyroscope	Vibrační gyroskop
FM	Frequency Modulation	Frekvenční modulace
FOG	Fibre Optic Gyroscope	Optický gyroskop
GPS	Global Positioning System	
IPD	Inteligent Pulse Decoding	Inteligentní pulsní dekodování
IR	Infra Red	Infračervené spektrum
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems	
PCM	Pulse-code Modulation	Pulzně kódová modulace
PIGA	Pendulating Integrating Gyroscopic Accelerometer	Integrační gyroskopický akcelerometr
PPM	Pulse-position Modulation	Pulzně fázová modulace
PWM	Pulse-width Modulation	Pulzně šířková modulace
RC	Radio Controlled	Rádiem řízené
SMD	Surface Mount Device	
SMM	Silicon Micro Machine	
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Bezpilotní létající prostředek
USB	Universal Serial Bus	
VSG	Vibrating Structure Gyroscope	Vibrační gyroskop

0 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem práce je navrhnout kompletní systém řízení letu pro bezpilotní létající prostředek, který splňuje předem dané požadavky. Dílčím cílem je provést analýzu systémů řízení dostupných UAV, z nichž se dále vybere nejvhodnější pro řešený prostředek. Samotný řídicí systém je úzce spjat s koncepcí prostředku. Tato problematika je natolik široká, že byla rozdělena do tří částí:

- Návrh konstrukce UAV s elektropohonem,
- Návrh pohonných jednotek pro UAV s elektropohonem,
- Návrh řízení UAV s elektropohonem .

Byly určeny požadavky na bezpilotní prostředek:

- užitečné zatížení 1 kg a jeho variabilita,
- minimální výdrž 30 minut letu,
- použití elektropohonu,
- rozmanitý rozsah operačních možností (monitorování objektu, tratí, rozsáhlých ploch),
- skladnost,
- minimální náklady na pořízení, provoz a údržbu,
- nenáročná obsluha.

Prostředky, které splňují dané požadavky, popisuje ve své bakalářské práci pan Vojtech Skotnica. Pohony vhodné k použití na těchto prostředcích jsou popsány v bakalářské práci pana Michala Podstawky. Částečná realizace prostředku, která má v praxi ověřit navržená řešení, bude provedena ve spolupráci s uvedenými studenty.

ÚVOD

Elektrotechnické a elektronické vybavení pro letecké modeláře zaznamenalo díky miniaturizaci v posledních letech obrovský pokrok. Není dnes problém při dostatku financí postavit letuschopný model, u kterého byl ještě před nedávnem provoz nemyslitelný. Z druhé strany jsou technologie výroby elektroniky stále přístupnější a dokonalejší, což vede ke zvětšení počtu jednotlivých výrobků na trhu a snížení jejich ceny. Tato bakalářská práce je zaměřena na analýzu těchto výrobků s cílem jejich implementace při řešení problematiky systémů řízení bezpilotních prostředků s kolmým vzletem. První část je věnována přehledu jednotlivých prvků nutných k zajištění řízení bezpilotního prostředku, jejich schopnostem a možnostem využití. Popsán je přenos signálů a jejich zpracování, prvky stabilizace, silové prvky a napájení. Druhá část je analýzou vhodných prvků řízení a volbou těch neoptimálnějších pro konkrétní bezpilotní prostředek s přihlédnutím ke zvolenému způsobu ovládání. Dále je popsán systém řízení jako celek. K odzkoušení navrženého řídicího systému slouží částečná realizace, která má v zjednodušené formě dokázat správnost navržených řešení, její popis je v poslední části práce.

1 PRVKY ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Před přistoupením k vlastní analýze je vhodné provést přehled principů fungování prvků nutných k zajištění ovládání bezpilotního prostředku. V této kapitole jsou všeobecně popsány jednotlivé komponenty, dále jsou udány důležité parametry, na které je třeba při návrhu brát zřetel a jsou zmíněné výhody a nevýhody různých variant řešení právě popisované problematiky. Komponenty popsány v této kapitole jsou:

- vysílací část,
- přijímací část,
- servomotory,
- prvky pro stabilizaci,
- napájení.

1.1 Vysílací část

Vysílač slouží k převedení povelů uživatele vydaných jako pohyby jednotlivých ovládacích prvků na elektrický signál a předání informace dál ve formě rádiové vlny. Pro ovládání základních letových funkcí jsou použity dva pákové ovladače (kniply). Další funkce jsou ovládány vícepolohovými přepínači nebo tlačítky. Podle vybavení lze vysílače dělit na tyto třídy:

- základní,
- nižší střední,
- střední,
- vyšší střední,
- extra.

Podle tvaru, nebo spíše podle způsobu držení se vysílače dělí na palcové, které uživatel drží v dlaních a kniply ovládá palci a pultové, které jsou určeny k zasunutí do pultu nebo k zavěšení na popruh a uživatel drží kniply mezi prsty.

Možnosti přenosu informace od vysílače k přijímači se během historie leteckého modelářství vyvíjely. Nejstarším způsobem je amplitudová modulace (AM), kdy se v signálu mění amplituda vln. Dnes se již prakticky nepoužívá. Další metodou je frekvenční modulace (FM). Základní je PPM kódování. U frekvenční modulace se při stálé amplitudě mění frekvence signálu a tím je přenášena informace. Podstatnou výhodou frekvenční modulace je

menší náchylnost na rušení. Pokročilejší variantou je PCM kódování (pulsion code modulation), u které je signál přenášén v digitálním kódu, který umožňuje kontrolu správnosti v procesoru přijímače a je ještě méně náchylná na rušení. Navíc zde existuje možnost nastavení tzv. Fail Safe režimu, který zajistí, aby při selhání přenosu došlo k předem nastavené konfiguraci kormidel a tím k minimálnímu poškození letadla.

Dalším problémem je volba kmitočtového pásma pro provoz. Historicky důležité, avšak v současnosti kvůli rušení nepoužívané, je pásmo 27 MHz. Pásmo 35 MHz je vyhrazeno pouze pro provoz létajících modelů a skládá se ze dvou dílčích pásem. Na frekvencích 40,665 MHz - 40,985 MHz jsou provozovány kromě modelů letadel rovněž modely aut a lodí, proto je zde větší nebezpečí rušení. Přehled dostupných kanálů je uveden v Tabulce 1.1. Čím dál více je využíváno pásmo 2,4 GHz, které sice zajišťuje velkou odolnost proti rušení a obousměrný tok signálů, má ale problémy s kompatibilitou výrobků různých firem.

Počet obsluhovaných kanálů je nejzákladnější vlastnost vysílače. Každý kanál znamená jednu řízenou funkci. Například pro klasické modely motorových letadel jsou potřeba 4 kanály (výškové kormidlo, směrové kormidlo, křidélka, plyn). V dnešní době jsou dostupné až 16-kanalové vysílače pro velmi pokročilé modely. Kanály mohou být proporcionální nebo neproporcionální. První z vyjmenovaných zajišťují prakticky spojitou změnu řídicího signálu. Příkladem může být ovládání kniplem, kdy při výchylce ovladače do určité polohy se i přiřazené kormidlo vychýlí na příslušný úhel. Neproporcionální jsou dvoupolohové či vícepolohové přepínače nebo tlačítka. Změna řídicího signálu je pak skoková a jako příklad lze uvést vysouvání podvozku či zapínání světel.

35 A		35B		40	
č. kanálu	frekvence [MHz]	č. kanálu	frekvence [MHz]	č. kanálu	frekvence [MHz]
61	35,01	182	35,82	50	40,665
62	35,02	183	35,83	51	40,675
63	35,03	184	35,84	52	40,685
64	35,04	185	35,85	53	40,695
65	35,05	186	35,86	54	40,715
66	35,06	187	35,87	55	40,725
67	35,07	189	35,89	56	40,735
68	35,08	190	35,9	57	40,765
69	35,09	192	35,91	58	40,775
70	35,1			59	40,785
71	35,11			81	40,815
72	35,12			82	40,825
73	35,13			83	40,835
74	35,14			84	40,865
75	35,15			85	40,875
76	35,16			86	40,885
77	35,17			87	40,915
78	35,18			88	40,825
79	35,19			89	40,935
80	35,2			90	40,965
				91	40,975
				92	40,985

Tab. 1.1 Frekvence schválené pro provoz leteckých RC modelů

Vzájemné ladění vysílače a přijímače na stejný kmitočet probíhá u běžných výrobků pomocí spárovaných krystalů, které se zasunou do zdírek v obou zařízeních. Jinou možností je využití vysílačů s kmitočtovou syntézou (označeny jako synth), u kterých volba kanálů probíhá výběrem v menu. Mohou pracovat s přijímači s kmitočtovou syntézou nebo s běžnými přijímači s výměnnými krystaly.

I základní vysílače nabízejí některé funkce, které by byly mechanickým způsobem podstatně obtížnější k provedení jako například nastavení směru otáčení, neutrálních poloh a maximálních výchylek servomotorů. U nižší střední kategorie je standardem volba módu, tedy rozložení řídicích prvků na vysílači, je možné se u nich setkat i se základními mixy. Mixy umožňují řídit letadla, která by byla bez nich prakticky neřiditelná, ale také ulehčují pilotáž. Příklady budiž mix pro elevony, pro motýlkové ocasní plochy, pro diferenciaci křidélek a jejich případné exponenciální výchylky. U vysílačů alespoň vyšší střední kategorie

se vyskytuje možnost letových režimů, kdy se při přepnutí do požadovaného režimu aktivuje daná kombinace mixů, což usnadňuje pilotáž. Přednastavené mixy je často možné dále upravovat, např. pro nelineární závislost mixování. Kromě toho existují i volně programovatelné mixy, u kterých se nastavují vztahy mezi jednotlivými řídicími signály. [5, 20, 21]

1.2 Příjímací část

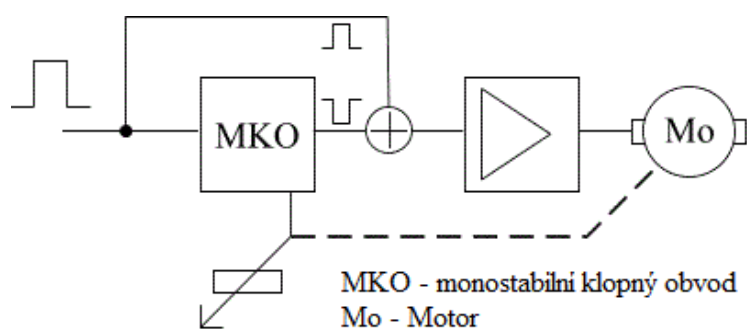
Příjímač má zajistit správný příjem signálu z vysílače a jeho následné zpracování a předání k servomotorům. Tři hlavní části přijímače jsou vysokofrekvenční, která přijímá signál (běžně obsahuje krystal), mezifrekvenční, která filtruje užitečný signál a nízkofrekvenční, vytvářející řídicí signál pro jednotlivé servomotory. Mezifrekvenční část může být jedna nebo mohou být dvě, hovoří se pak o jednoduchém (Single Conversion), resp. dvojím směšování (Double Conversion). Dvojí směšování je méně náchylné na vnější rušící vlivy. Z praxe je známo, že jsou přijímače náchylné na vibrace a otřesy, proto je třeba je náležitě chránit. V případě, že přijímač pracuje v modulaci PCM a umožňuje Fail Safe mód, přebírá plnou zodpovědnost za řízení modelu při výpadku signálu z vysílače, v praxi to tedy znamená nastavení servomotorů do předem dané nouzové polohy. Nevýhodou PCM modulace je delší čas zpracování signálu v přijímači, což může být problém v případě rychlého manévrování. Příjímače s inteligentním dekódováním (IPD) spojují výhody FM a PCM modulace, tedy rychlou reakci a kontrolu správnosti signálu i s Fail Safe režimem. Pro zvýšení spolehlivosti je možné využít přijímačů s vestavěným přepínačem napájecích akumulátorů, tehdy se při výpadku napájení z hlavního zdroje přepne odběr na zdroj záložní a nedojde tak k nevyhnutelné nehodě. Existují i systémy, zajišťující rovnoměrné vybíjení obou akumulátorů. [5, 10, 20]

1.3 Servomotory

Servomotor neboli krokový motor je takový, u kterého lze nastavit přesnou polohu natočení osy. V praxi jsou nejčastěji využívány elektrické servomotory, existují ale také pneumatické, hydraulické či parní. V UAV jsou používány stejnosměrné elektrické servomotory, tzv. modelářská serva především pro pohyb řídicími plochami. Základními konstrukčními prvky těchto komponentů (zjednodušené schéma na Obr. 1.1) jsou:

- motor – jeho velikost určuje tah servomotoru,

- deska elektroniky – řídicí součást, v současnosti zhotovena technikou plošné montáže (SMD),
- převodovka – soustava ozubených kol z plastu (nebo kovu pro větší zatížení), její převodový poměr určuje tah a rychlost servomotoru. Převodem je převážně zajištěno otáčení servomotoru v rozsahu 180° nebo mírně větším,
- výstupní hřídel - přenáší pohyb mechanismu servomotoru na ovládací páku. U servomotorů menších a nižších kategorií je uložen v plastovém pouzdru, servomotory vyšších kategorií mají pro přesnější chod a vyšší životnost kuličková ložiska,
- pouzdro – je nejčastěji plastové, vybaveno patkami pro montáž
- potenciometr – uzavírající člen smyčky zpětné vazby. Snímá polohu výstupního hřídele a zajišťuje tak správnou funkci servomotoru. Potenciometr je připojen buďto přímo na hřídel, nebo pro ochranu proti vibracím přes zvláštní převod, což se vyskytuje u větších a dražších servomotorů.



Obr. 1.1 Blokové schéma modelářského servomotoru.

Zdroj: <<http://vlastikd.webz.cz/bastl/serva.htm>>

Parametry uváděny pro servomotory jsou:

- tah (nejčastěji udáván v kg/cm),
- rychlost (udávána jako čas potřebný k otočení o určitý úhel),
- šířka pásma necitlivosti (udává minimální změnu šířky řídicího impulsu, při které dojde k práci servomotoru, je to vhodné, aby nedocházelo k zbytečnému kmitání servomotoru vlivem velmi malých pohybů ovládacího prvku na vysílači)

Dalšími důležitými parametry jsou rozměry, hmotnost, způsob uložení hřídele, materiál zhotovení převodů a pracovní napětí.

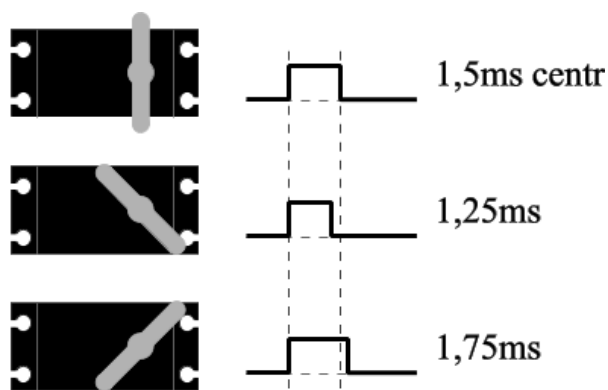
Podle velikosti lze servomotory rozdělit na:

- pikoserva,

- mikroserva,
- miniserva,
- standardní serva,
- maxiserva.

Dle způsobu zpracování signálu se servomotory dělí na analogové a digitální. Digitální verze mají sice při stejné velikosti větší spotřebu energie a vyšší cenu, nabízejí ale nesporné výhody. Odezva digitálního servomotoru může být až pětikrát rychlejší. Dále jsou s to vyvozovat maximální tah při každé výchylce oproti analogovým, u kterých je plný tah přiřazen až jisté větší výchylce. Digitální zpracování signálu také zajišťuje přesnější ovládání, jelikož pracuje s mnohem větším počtem kroků na stejnou výchylku v porovnání s analogovým. Při použití programátorů serv, které mohou sloužit rovněž jako testery, lze nastavit parametry digitálních servomotorů, jako jsou smysl a velikost výchylky, poloha neutrálu, rychlost a šířka pásma necitlivosti, či nouzový fail-safe režimu. Do servomotoru vedou celkem tři vstupy. Jsou to kladný pól napájení, záporný pól napájení a řídicí signál.

Řídicí signál má pulzně šířkovou modulaci (PWM – Pulse Width Modulation). Při tomto druhu modulace je u modelářských servomotorů konstantní frekvence 50 Hz (tedy perioda pulzů 20 ms). Nositelem informace je šířka jednotlivého pulzu neboli délka jeho trvání. Standardně středové poloze odpovídá délka trvání pulzu 1,5 ms (pro některé servomotory 1,6 ms), maximálním výchylkám přísluší šířky pulzů 1 ms – 2 ms (u méně přesných servomotorů 1,25 ms – 1,75 ms). Tento případ je zobrazen na Obr. 1.2. [5, 10, 20, 25]



Obr. 1.2 Šířka signálu a odpovídající výchylka hřídele servomotoru

Zdroj: <<http://vlastikd.webz.cz/bastil/serva.htm>>

1.4 Prvky pro stabilizaci

Stabilizace je stěžejní problém bezpilotního létajícího prostředku s kolmým vzletem. Je to dáno povahou samotného zařízení. Zajištění stability letounu se provádí aerodynamickými metodami, případně posouváním těžiště. Letadlo s rotujícími nosnými plochami je ze své podstaty labilní a konstruktéři s tímto problémem bojovali od samotného vzniku vrtulníků. Moderní miniaturní elektronické prvky mohou zajistit stabilitu jinak neřiditelného letadla a to podstatně jednodušším způsobem než mechanická řešení. Tento fakt je důvodem popisu těchto zařízení:

- gyroskopy,
- akcelerometry,
- teplotní stabilizace.

1.4.1 Gyroskopy

Gyroskopy jsou zařízení, která se mohou použít ke stanovení úhlové rychlosti (rotace). Podle konstrukce se dělí na:

- mechanické,
- optické,
- vibrační,
- kvantové,
- jaderné.

Mechanický gyroskop je obecně tuhé souměrné těleso otáčející se kolem své osy velkou rychlostí. Jestliže na gyroskop nepůsobí vnější síly, udržuje jeho osa stále stejný směr. V případě výskytu sil působících na gyroskop rušivým momentem, vzniká gyroskopický efekt projevující se precesním pohybem. Tyto vlastnosti lze využívat ke stabilizaci. V moderním modelářství se kvůli vysoké hmotnosti a výrobní náročnosti odstoupilo od používání mechanických gyroskopů.

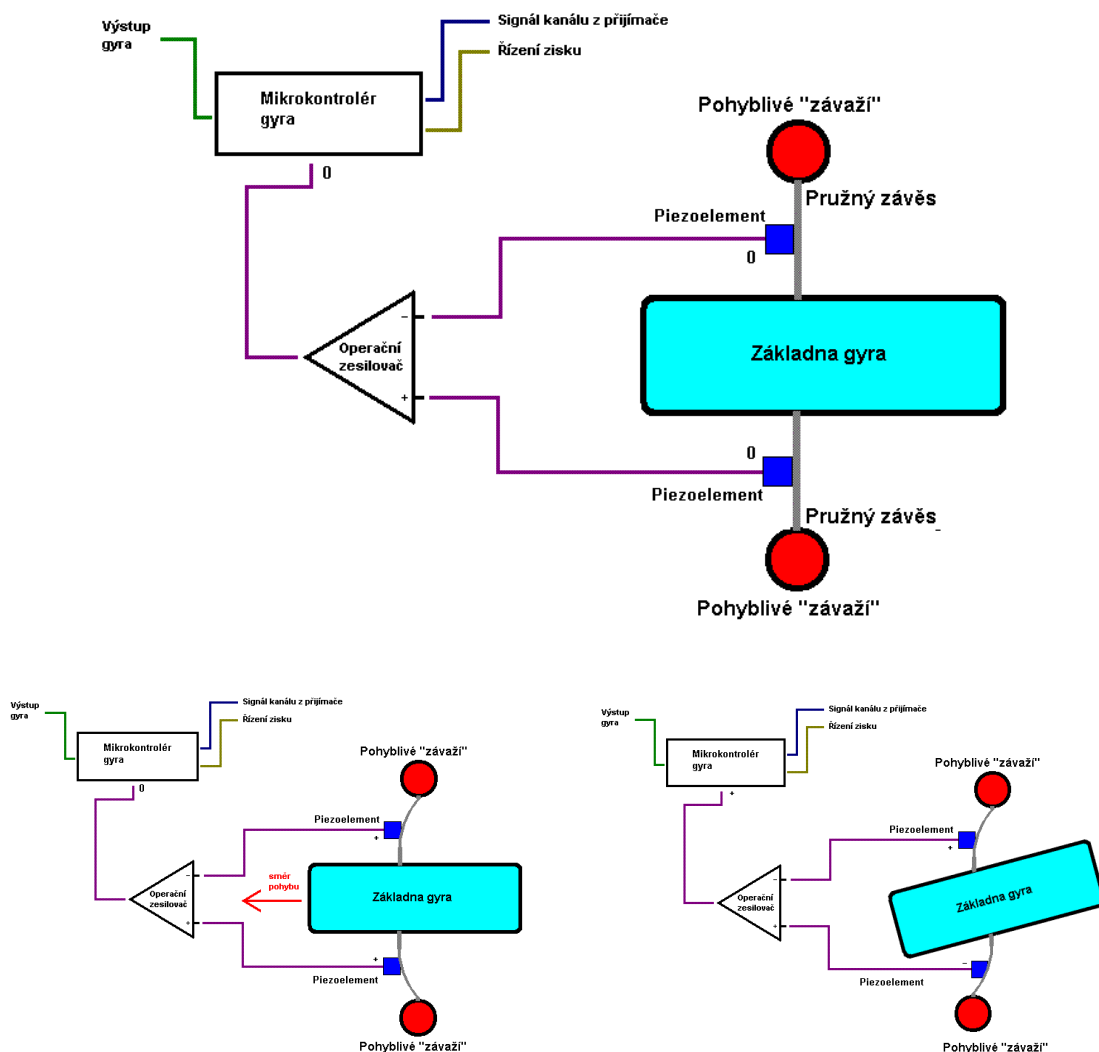
Optické gyroskopy lze dělit na laserové a vláknové (FOG – Fibre Optic Gyroscope). U prvních dochází při rotaci na optické dráze ke změně frekvence, u druhých k fázovému posunu. Oba gyroskopy pracují na principu Sagnacova efektu. U laserového gyroskopu se při otáčení zařízení prodlužuje dráha paprsku, který se šíří ve směru otáčení a zkracuje dráha paprsku šířícího se ve směru opačném. V tomto případě je rozdílný rovněž kmitočet obou

paprsků. Ten je vyhodnocen a je určena výsledná úhlová rychlost. Oproti mechanickému gyroskopu je laserový lehčí, menší, spolehlivější a přesnější. V konstrukci vláknového gyroskopu je použito optické vlákno velké délky (až 5 km) v uspořádání připomínajícím cívku, tj. jako řada smyček. Z obou konců vlákna se šíří paprsek světla. Poté jsou oba paprsky skládány ve vyhodnocovacím zařízení, kde se určí fázový posun. Ten je dán rozdílnou dráhou uraženou jednotlivými paprsky v případě nenulové úhlové rychlosti zařízení. Nejnovější vláknové gyroskopy vykazují dokonce větší přesnost a spolehlivost než laserové a nacházejí uplatnění mj. v kosmickém průmyslu.

Vibrační gyroskopy, neboli VSG (Vibrating Structure Gyroscope) či CVG (Coriolis Vibratory Gyroscope), fungují na principu detekce Coriolisovy síly. Coriolisova síla je zdánlivá síla působící na pohybující se hmotný bod v rotující soustavě. Teorie použití tohoto typu gyroskopů vychází z poznatku, že kmitající těleso má sklon pro zachování stále stejné roviny kmitání. Vibrační gyroskopy jsou při stejné přesnosti jednodušší a levnější než mechanické.

Piezoelektrické gyroskopy pracují na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev je vznik elektrického potenciálu na mechanicky namáhaném tělese, které projevuje takovéto vlastnosti, nebo deformace téhož tělesa vlivem přiložení elektrického napětí. Piezoelektrický jev se vyskytuje u vybraných anizotropních krystalů s iontovou vazbou a u některých tekutých krystalů. V současnosti se často piezoelektrické gyroskopy vyskytují v integrovaném provedení MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). V tělese přístroje je pak malý trojhran z piezoelektrické látky rozkmitán na určitou frekvenci, jakákoli změna úhlové rychlosti se promítne v chování zmíněného trojhranu, což poskytuje možnost určení směru a velikosti otáčení (pohybu). Schematicky je princip zobrazen na Obr. 1.3. Nevýhodou tohoto typu je, že gyroskopy snímají pouze v jednom směru, a to kolmém na osu čipu. Další nepříjemností je vliv teploty na přesnost gyroskopu, tzv. teplotní drift. Velkou vymožeností moderních piezogyroskopů je funkce Heading Hold (či Heading Lock). Gyroskop s touto funkcí nejenom zastaví pohyb způsobený například poryvem větru, ale také vrátí zařízení do původní polohy vztažené na osu působení gyroskopu. Firma Futaba zavedla název AVCS (Active Angular Velocity Control System), který zaručuje větší přesnost funkce Heading Hold díky technologii SMM (Silicon Micro Machine), která odstraňuje teplotní drift tak, že spojuje vlastnosti mechanických a piezoelektrických gyroskopů. Jinou dnes běžnou funkcí je

Pilot Authority Mixing, která snižuje citlivost gyroskopu při výchylce ovladače kormidla, což umožňuje přesnější pilotáž.



Obr. 1.3 Schéma piezoelektrického gyroskopu v klidu a naznačený průhyb závěsů se závažím při přímočarém pohybu, resp. při rotaci [21]

Kvantový gyroskop využívá oproti jadernému ke své funkci vlastnosti atomových jader, druhý z vyjmenovaných pracuje na principu jaderného paramagnetismu látek. Oba se vyznačují vysokou přesností a jemností. [2, 6, 7, 21, 25]

1.4.2 Akcelerometry

Akcelerometry, jak už z názvu vyplývá, slouží k měření akcelerace neboli zrychlení. Současné akcelerometry dokáží indikovat malé změny v pohybu, zrychlení řádově

ve zlomcích G, existují však speciální provedení schopné obstát i u hodnot v řádu stovek G. Dnes existuje spousta typů a provedení akcelerometru, to je důkazem velmi širokého využití těchto senzorů v průmyslu a technice všeobecně. Při návrhu a stavbě plně automatického systému řízení pro bezpilotní létající prostředek jsou akcelerometry nezbytným vybavením. Zde je výčet nejpoužívanějších typů akcelerometrů:

- piezoelektrické (PE),
- piezorezistivní (PR),
- s proměnnou kapacitou (VC),
- tepelné.

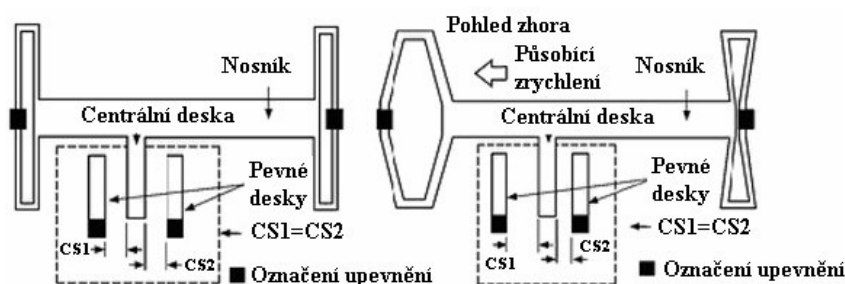
Z historického hlediska důležitý je tzv. PIGA (Pendulating Integrating Gyroscopic Accelerometer) akcelerometr, který byl navržen pro německou raketu A-4 (známou spíš jako V-2) v období druhé světové války. Využívá gyroskop zavěšený na výkyvném rameni a elektrické kontakty pro indikaci výchylek ramene a byl využíván v mnoha raketových systémech, kde je v omezené míře k nalezení i dnes. Pro úplnost je vhodné zmínit akcelerometry laserové, optické, založené na Hallově jevu, magnetooporové a megnetoindukční.

Piezoelektrické akcelerometry využívají piezoelektrický materiál, na kterém vzniká elektrický náboj úměrný mechanickému namáhání způsobeného zrychlením. Měření na krystalu se provádí buď přímo pomocí externí elektroniky, nebo vnitřní elektronika převádí náboj na napěťový výstup. Konstrukčně je senzor proveden tak, že je piezoelektrická látka připevněná k pouzdru, na ní je pak umístěná tzv. seizmická hmota (Seismic Mass). Seizmická hmota je v zjednodušení závaží, které při změně rychlosti působí na piezoelektrickou látku silou úměrnou zrychlení, což vyplývá z druhého Newtonova zákona. Výstupní signál v podobě náboje je taktéž úměrný akceleraci, jelikož seizmická hmota má konstantní hmotnost. Nevýhodami piezoelektrických akcelerometrů je jejich neschopnost snímat konstantní zrychlení a rozměry, které nemohou být dále snižovány, jsou ale relativně nenáročné na výrobu, proto hojně využívány.

Piezorezistivní akcelerometry využívají taktéž piezoelektrický materiál, který při působení zrychlení mění svůj odpor. Měření pak probíhá pomocí základního nebo polovičního Wheatstoneova můstku, vyhodnocovací obvod je v tom případě poměrně jednoduchý. Dnes nejpoužívanější princip byl vynalezen v roce 1979. Je založen na použití ohybu jednoho konzolového nosníku z piezorezistivního křemíkového materiálu vlivem

působícího zrychlení. Ohybem se mění odpor, který je měřen. Existují i piezorezistivní akcelerometry pracující na podobném principu jako piezoelektrické, tedy s použitím seizmické hmoty. Oproti piezoelektrickým akcelerometrům dokážou snímat i konstantní zrychlení, jsou menší a přesnější. Nevýhodou je závislost výstupu na teplotě, což je však možné kompenzovat pomocí samočinného testování. Touto funkcí jsou vybaveny mnohé v praxi používané akcelerometry, např. u automobilových airbagů.

Princip činnosti akcelerometrů s proměnnou kapacitou je založen na změně kapacity vnitřního kondenzátoru, vlivem působící síly vzniklé zrychlením pouzdra zařízení. V teorii se jedná o závaží tvořící jednu desku kondenzátoru, spojené pružinou s druhou deskou, která je pevně spojena s pouzdrem (jak je patrné z Obr. 1.4). V těchto senzorech se využívá křemíkových krystalů a v praxi jsou použity tři desky, vnější pevné a centrální, pevně spojená s deformujícím se nosníkem. Působícím zrychlením dojde k posunutí prostřední desky a tím dojde ke změně dělicího poměru diferenciálního kondenzátoru. Takováto struktura umožňuje měřit kladná i záporná zrychlení a to jak statická (gravitační – ke stabilizaci) tak dynamická.

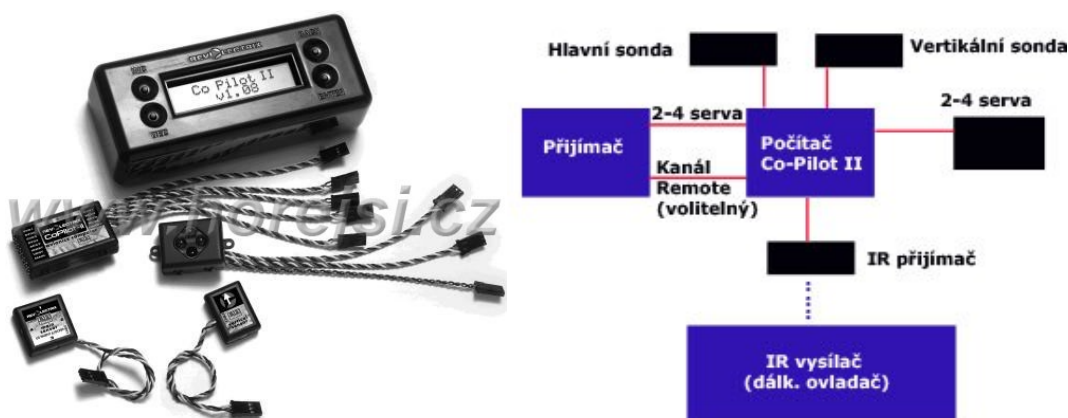


Obr. 1.4 MEMS akcelerometr s proměnnou kapacitou v klidu a při nenulovém zrychlení [8]

Tepelné akcelerometry využívají rozdílného přenosu tepla v plynu při klidném nebo pohybujícím se topném tělísku. Základními částmi je zmíněné topné tělísko ve vzduchové komoře vybavené teplotními snímači. Jestli je zařízení v klidu, rozložení teploty je kolem topného tělíska rovnoměrné, jestliže dojde k pohybu, ohřátý plyn se vlivem setrvačnosti posune proti směru pohybu a tím se změní rozložení teploty měřené snímači. Z prostorové změny lze vyčíst směr pohybu, z teplotního rozdílu zrychlení, potažmo rychlost pohybu. Tato metoda je použitelná plošně, to znamená, že se může měřit ve dvou osách. Díky jednoduché konstrukci bez mechanických prvků jsou tyto akcelerometry velmi spolehlivé, odolné (zrychlení až 50 000 G) a mají velký tepelný rozsah měření. Naopak k nevýhodám patří nižší přesnost a především velký vliv okolní teploty na citlivost měření. Tento jev se často kompenzuje využitím druhého senzoru (termistoru), který může být umístěn i přímo na čipu akcelerometru. [7, 8]

1.4.3 Stabilizace pomocí snímání rozdílů teplot na horizontu

Tento systém je relativně nový. Funguje na principu snímání rozdílů teplot oblohy a země. U komerčně nabízeného výrobku Co-Pilot II firmy FMA Direct by tento rozdíl měl činit nejméně 9 °C, což je v podmínkách normální viditelnosti lehce dosažitelná hodnota. Teploty jsou měřeny 60 krát za minutu pomocí dvou senzorů (horizontálního a vertikálního). Horizontální (jinak hlavní) senzor se čtyřmi pyrosenzory po stranách zajišťuje stabilizaci, vertikální zjišťuje, jestli je letadlo v normální poloze či v poloze na zádech. Krom toho vertikální senzor může rovněž řídit stabilitu v nožovém letu. Informace ze senzorů jsou zpracovávány v procesorové jednotce, která je vložena mezi přijímač a servomotory. Sensory i procesorová jednotka jsou ovládány z programovacího terminálu, který s nimi komunikuje pomocí IR portu. Celé palubní vybavení má hmotnost 40 g. Systém je primárně určen pro výuku létání nebo pro zajištění bezpečného provozu drahých modelů. Nevýhodou je, že stabilizace není možná, pokud rozdíl teplot není větší než uvedených 9 °C, to se může stát v podmínkách zhoršené viditelnosti (mlha) nebo také při provozu mezi budovami, v lese, apod. Cena stabilizačního zařízení Co-Pilot je 3519 Kč. Vzhled a schéma zařízení je na Obr. 1.5. [23, 25]



Obr. 1.5 Systém Co-Pilot II a jeho blokové schéma [23]

1.5 Napájení palubní elektroniky

Pro napájení palubních spotřebičů se u leteckých modelů používá zpravidla akumulátorů. Standardní jsou dnes dvě hladiny napětí akumulátorů, tj. 4,8 V a 6 V, což odpovídá čtyřem, resp. pěti článkům po 1,2 V. Vyšší hladina napětí je určena pro větší konstrukce, při vyšším napětí roste rychlost i tah serv, ale také spotřeba energie a opotřebení mechanických částí. Nejčastěji se používá běžných akumulátorů NiCd a NiMH, kromě toho

se dá setkat i s Li-Ion, Li-Pol, Li-Fe akumulátory. Proudový odběr přijímače je podstatně nižší než servomotorů a je v rozmezí 20 až 30 mA, proto je třeba při použití většího počtu servomotorů velkých modelů nasadit tzv. rozvaděče napájení. V tomto případě napájení servomotorů není vedeno přes přijímač. Podle požadované výdrže letu je nutno vybrat články s vhodnou kapacitou. Je třeba vynásobit maximální délku letu a odběr proudu palubního vybavení, výsledek výpočtu se pak vynásobí zvoleným bezpečnostním koeficientem, aby bylo zajištěno, že ovládací prvky letadla budou pracovat déle, než je doba letu. Kromě správného dimenzování je nutné pamatovat na dodržení maximálních dovolených odběrů pro daný akumulátor. Jiným způsobem napájení elektrických palubních spotřebičů je tzv. BEC. BEC je stabilizátor napětí pro modely s elektrickým pohonem, díky němuž je umožněno napájet palubní elektroniku i servomotory pomocí akumulátorů určených pro motory, a to přes jejich značně vyšší napětí. [10, 20, 21]

2 ANALÝZA A VÝBĚR ŘÍDICÍHO SYSTÉMU PRO UAV S ELEKTROPOHONEM

Pro analýzu a následný výběr prvků řídicího systému je nezbytné nejprve určit koncepci ovládání UAV. Podle této volby lze určit prvky, které jsou nutné pro řízení UAV, přičemž je vhodné se řídit jejich vlastnostmi, jak jsou uvedeny v Kap. 1. Je nasnadě, že některé prvky jsou natolik stěžejní, že by byl bez nich provoz jakéhokoli UAV nemyslitelný. Těmito prvky jsou:

- vysílač,
- přijímač,
- servomotory,
- systém napájení,
- vodiče.

Další kategorii tvoří dodatečné vybavení, které je vynuceno koncepcí navrhovaného UAV. Zde lze zařadit:

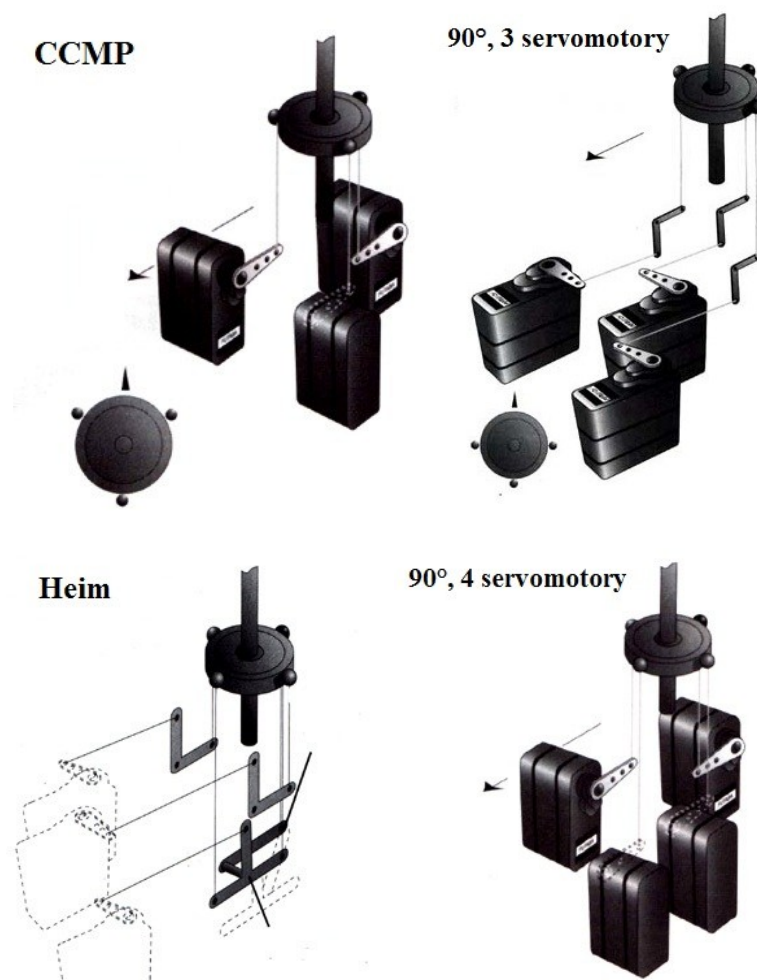
- řídicí jednotku,
- systém stabilizace.

2.1 Ovládání v režimu svislého letu

Volbu koncepce UAV popisuje ve své práci Vojtech Skotnica. Jedním ze závěrů této práce je použití pro pohon dvojice rotorů. Problematikou ovládání dvourotorového letadla s kolmým vzletem se konstruktéři zabývali od doby objevení se prvních vrtulníků. Dva rotory v tandemovém uspořádání jsou schopny nabídnout především větší nosnost, protože je celý výkon pohonné jednotky přenášen na hlavní rotory, dále větší rozsah centráže a lepší podélnou stabilitu. Průkopníkem ve výzkumu tohoto uspořádání byl ve 40. a 50. letech 20. století americký inženýr polského původu Frank Piasecki. Principiálně se musí oba rotory otáčet protiběžně, to ruší moment od rotoru, který je u vrtulníků klasické koncepce kompenzován vyrovnávací vrtulkou. Při použití jednoho motoru (což je v těchto strojích běžné) je nutná komplikovaná transmise. U vrtulníků této koncepce se pro ovládání využívá dvou vrtulníkových hlav. Vrtulníková hlava je poměrně složité zařízení, které obstarává skoro celé ovládání vrtulníku. Za předpokladu, že se nosný rotor otáčí stále stejnými otáčkami, je nutno pro zvýšení tahu zvýšit úhel náběhu rotorových listů. K tomuto účelu slouží

tzv. kolektivní řízení. Při zvýšení úhlu náběhu rotorových listů se zvýší rovněž jejich odpor, proto musí dojít k nárůstu výkonu motoru pro udržení konstantních otáček. Podstatně komplikovanějším problémem je zajištění pohybu ve vodorovné rovině. Pro ovládání tohoto pohybu bylo vyvinuto cyklické řízení. V principu jde o zastoupení změny roviny otáčení rotoru, kdy by se musela natáčet hřídel i s celou pohonnou jednotkou. Při použití cyklického řízení dochází k periodické nesouhlasné změně úhlu náběhu listů a to tak, že se na jedné straně úhel zvyšuje a tím dochází k vychýlení konce listu směrem vzhůru, a na druhé straně zmenšuje, přičemž se koncovka listu vychyluje dolů. Pro to je nutný předpoklad výkyvného uložení v kolmé ose a to buď pomocí kloubového, nebo polotuhého závěsu. Jako nástroj pro docílení cyklického ovládání slouží deska cykliky, tvořena dvěma prstenci umístěnými na hřídeli rotoru. Spodní prstenec se neotáčí, jsou k němu připojena táhla pro naklánění. Tento náklon přejímá vrchní otáčející se prstenec prostřednictvím čepů pohybujících se v drážce spodního prstence a dále jej přenáší pomocí táhel k rotorové hlavě. Její pohyby umožňují klopení a klonění letadla. V praxi se pak při použití kolektivu i cykliky posouvá ve svislém směru celá deska cykliky pomocí mechanismu kolektivu. Pro řízení vrtulníkové hlavy se v modelářství používá soustavy přesných a rychlých servomechanismů.

Základním způsobem řízení desky cykliky, který se pro modely vrtulníků používá, je zapojení přes mechanický mixér. Ovládání je pomocí jednoho nebo dvou servomotorů. Deska je mechanicky komplikovaná. Na vysílači se volí režim H1. Režim H2 je ve vysílačích implementován pro systém ovládání Heim. Ten k práci potřebuje taktéž dva servomotory a poměrně složitou mechaniku. Jinou koncepcí je tzv. CCPM ovládání. Používá tři servomotory, které ovládají páky na desce, které jsou vzájemně posunuty o 120° . Výhodou tohoto uspořádání je, že zde není použit mechanický mixér. Nevýhodou je poměrně složité řízení, které zvládnou pouze vysílače vyšších tříd v režimu H3 nebo modely s řídicí jednotkou. Další možností zapojení tří servomotorů je při rozmístění pák s úhlem 90° . Pro tento způsob se volí režim H4, stejně jako u použití čtyř servomotorů s tímž úhlem pák. Jednotlivé varianty jsou na Obr. 2.1. [2, 22, 25]



Obr. 2.1 Ovládání desky cyklicky modelů [22]

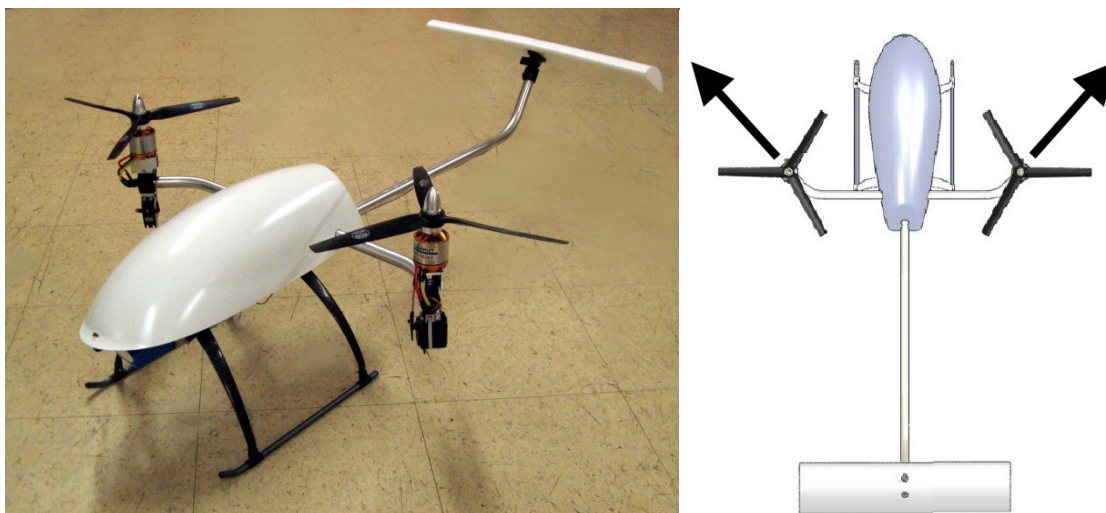
Odlišnou koncepcí je zastoupení vrtulníkové hlavy jinými prostředky. Tento způsob ovládání je použit mj. ve vícerotorových modelech vrtulníků, např. QuadroCopter a TriCopter od firmy Multicopter a jim podobných. Kolektivní řízení je zastoupeno regulací otáček motorů. Ta je u těchto UAV zajištěna frekvenčním měničem pro každý motor zvlášť. Dodatečně je u nich zabudována řídicí jednotka FlightCtrl s procesorem Atmega umístěna mezi přijímačem a měniči, která umožňuje ovládání prostředku pomocí běžné RC soupravy vysílače a přijímače. Přijímané povelů převádí na signál k jednotlivým měničům, ty dále ovládají otáčky pohonných jednotek a potažmo rotorů. U třírotorové verze TriCopter je navíc jedno rameno s pohonnou jednotkou i rotorem otočné (ovládání pomocí jednoho servomotoru), díky tomu se může letadlo otáčet kolem svislé osy. V čtyřrotorové verzi QuadroCopter není toto potřeba. Dvě dvojice protiběžných rotorů při stejných otáčkách vzájemně kompenzují své momenty, proto stačí snížení otáček vždy dvou souběžných rotorů a zvýšení otáček dvou zbylých pro obdržení momentu k otáčení kolem svislé osy. Pro

kontrolu polohy a stabilizaci slouží gyroskopy zabudované na základní desce. Tato firma začala v roce 2011 s výrobou dvourotorového vrtulníku TwinCopter inspirovaného filmem Avatar (Obr. 2.2). Tento model je ovládán pomocí otáček rotorů a nezávislého překlápění hřídelí, na kterých jsou umístěny rotory, směrem dopředu a dozadu. Letadlo je osazeno velmi podobnou řídicí jednotkou jako vícerotorové verze. Tato koncepce je pro námi navrhovaný létající prostředek použitelná, realizace by byla ale obtížná z důvodu množství úprav v systému stabilizace, které by byly nutné pro dosažení požadovaných výsledků. [19]



Obr. 2.2 Twin Copter Avatar [19]

Zdařilou filozofii ovládání UAV s kolmým vzletem prezentují výrobky kanadské společnosti Gress Aerospace Vector 450, nVader 600 (Obr. 2.3) a eVader 750. Tyto dvourotorové prostředky jsou ovládány taktéž změnou otáček rotorů pro zvýšení tahu při svislém letu a pro klonění. Pro klopení a zatáčení kolem svislé osy jsou rotory umístěny na výkyvných závěsech ovládaných jedním servomotorem pro každý rotor. Závěsy umožňují výchylky v jedné ose směrem dopředu a ven, resp. dozadu a dovnitř s úhlem 45° . Pro rychlejší let je v ocasní části umístěn vodorovný stabilizátor s velkým úhlem náběhu. Při dopředném letu tak tento prvek zvyšuje náklon letadla a umožňuje rotorům práci v rovině bližší svislé. Řízení je zajištěno řídicí jednotkou GMM (Gyro/Mixer Module), která kromě signálů z vysílače využívá vstup z trojosého gyroskopu. Nevýhodou tohoto provedení je nízká variabilita z důvodu nutnosti použití dané řídicí jednotky (absence konkurenční), která není vhodná pro další modifikace. [12]



Obr. 2.3 nVader 600 a znázornění výchylek rotorů při dopředném pohybu [12]

Americká firma Freewing nabízí bezpilotní prostředek Spirit (Obr. 2.4) pro monitorovací účely. Zajímavostí tohoto modelu je použití překlopných nosných ploch i pohonné jednotky, souhrnně nazváno Tilt-Boom. V principu lze tuto koncepci použít i pro dvoumotorové letadlo, zde je ale v provedení se dvěma koaxiálními rotory. Základem je použití rotorů s deskou cyklicky i kolektivem uložených na nepoháněném výkyvném rameni. Kromě toho jsou na rameni řídicí plošky dodatečně vychylující proud vzduchu. Taktéž křídlo je volně uloženo v otočném čepu. Při zvyšování dopředné rychlosti naklápěním desky cyklicky ve spojení s řídicími ploškami vzniká na nosných plochách moment, který překlápí křídla ze svislé roviny směrem k vodorovné, přitom na nich vzniká vztlaková síla. Tento proces pokračuje, až jsou křídla i rameno s rotory překlopené do vodorovné polohy. Před přistáním dochází k opačnému procesu, kdy se křídla i rameno pouze vlivem aerodynamických sil a momentů překlápějí zpět do svislé polohy. Výhodou této koncepce při správném návrhu je stabilita ve všech režimech letu a mechanická jednoduchost. Obtížně řešitelnou úlohou je problém vyvážení. Nejedná se pouze o prostředek jako celek, ale také o výkyvné rameno s rotory a křídla. Stabilita musí být navíc zajištěna při všech rychlostech a rozmístěních užitečného nákladu, což znamená nesplnění základního požadavku pro variabilitu umístění užitečného nákladu a vyžaduje komplikované výpočty a analýzy. Z tohoto důvodu není řešení vhodné k realizaci. [14]



Obr. 2.4 Freewing Spirit – princip letu [14]

Částečný závěr

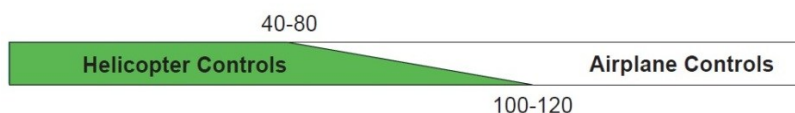
Jako nejvhodnější uspořádání se jeví použití dvou vrtulníkových hlav. Umožňuje největší manévrovatelnost a i přes zdánlivou komplikovanost zajistí variabilitu, možnost modifikace v budoucnosti a zjednoduší ovládání ve vodorovném letu. Pro potvrzení správnosti této volby je vhodné uvést, že Bell/Boeing V-22 Osprey (jediný konvertoplán v činné službě, na Obr. 2.5) používá tento systém ovládání. Řízení je zajištěno systémem fly-by-wire. Jako vstup systém využívá signálů z palubní avioniky a z výchylek prvků řízení obou pilotů. Na výstupu jsou servomechanismy pro ovládání mechaniky rotorů, flaperonů, směrového a výškového kormidla, dále mechanismu překlápění motorových gondol s rotory a také skrz FADEC putují signály do motorů. Pro klonění ve „vrtulníkovém“ módu se u V-22 používá nesouhlasného kolektivního řízení a zároveň vychýlení obou rotorů pomocí cyklik ve směru klonění. Při klopení cykliky obou rotorů zajišťují souhlasnou výchylku rotorů ve směru klopení. Otáčení kolem svislé osy je zajištěno nesouhlasným vychýlením rotorů opět pomocí desek cykliky. Tah je ovládán změnou úhlu náběhu listů pomocí kolektivu a zároveň změnou otáček motorů. Ve svislém letu jsou flaperony vychýleny směrem dolů, usměrňují tak průtok vzduchu od rotorů a zvyšují vztlakovou sílu na křídle při nízkých rychlostech. Princip ovládání námi navrhovaného UAV je téměř totožný s uvedeným. Po analýze konstrukčních možností bylo upuštěno od použití jakékoliv mechanizace křídla, proto nebude probíhat zmíněné usměrňování proudu vzduchu pomocí klapky či flaperonů, což ale při navrhovaných rozměrech letadla nehraje velikou roli. Další odlišnosti je použití konstantních otáček rotorů. [9, 15, 18]



Obr. 2.5 Bell/Boeing V-22 Osprey [18]

2.2 Ovládání v režimu vodorovného letu

Konvertoplán se v režimu horizontálního letu chová v podstatě jako dvoumotorový letoun. Obecně se za klasické uspořádání kormidel považuje použití křidélek pro klonění, výškového kormidla pro klopení a směrového kormidla pro zatáčení. Existují samozřejmě mnohé další modifikace, jako například sdružené motýlkové ocasní plochy, flaperony, či speciální ovládací prvky pro letadla s atypickým půdorysem křídla, celkově ale lze prohlásit, že naprostá většina současných letounů používá popsané schéma ovládání. Zmíněný V-22 Osprey je rovněž takto ovládán za použití zdvojeného směrového kormidla a flaperonů. Jako zvláštnost u tohoto typu lze zmínit ovládání v přechodovém režimu mezi „vrtulníkovým“ a „letounovým“ módem. Jelikož při nižších rychlostech křídlo nevytváří vztlak a kormidla mají příliš nízkou účinnost, není je možno používat. Při těchto rychlostech celé ovládání obstarávají rotory. Teprve při rychlosti 40 knotů začínají do řízení zasahovat kormidla a dále při zvyšování rychlosti postupně v stále větší míře přebírají ovládání, až se při rychlosti 120 knotů vypojí cyklické řízení rotorů, což je patrné z Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Přechod mezi vrtulníkovým a letounovým ovládáním konvertoplánu Osprey [18]

Takto komplikované ovládání není pro námi navrhované UAV potřeba z důvodu nižších rychlostí letu. Ve snaze o maximální zjednodušení řízení a snížení hmotnosti bylo

rozhodnuto, že se v největší možné míře použije prvků, které již slouží k ovládání prostředku během vertikálního letu. Díky tomu není potřeba do konstrukce zahrnovat křídélka. Výškové i směrové kormidlo je pro zachování dobré manévrovatelnosti nutné zachovat. Při rotorech překlopených pro horizontální let se tak klonění ovládá nesouhlasným vychýlením desek cyklicky rotorů, zatačení pomocí nesymetrického použití kolektivního řízení a zároveň pomocí cyklicky, dodatečně je vychylováno směrové kormidlo. Klopení obstarává výškové kormidlo s pomocí desky cyklicky. Tah je ovládán pomocí kolektivu. Tento systém ovládání se osvědčil při zkouškách na simulátoru RealFlight, který je považován za nejlepší a nejrealističtější simulátor pro letecké modeláře. Zkoušky proběhly na modelu V-22 Osprey, na kterém byly v nastaveních křídélka i vztlakové klapky zablokovány v neutrální poloze. V horizontálním letu si letadlo zachovalo velmi dobrou řiditelnost, byť klonění ovládalo pouze cyklické řízení. [11, 18]

2.3 Návrh řídicí jednotky

Řídicí jednotka je centrálním článkem systému řízení. Pro ovládání UAV s kolmým vzletem a dvěma rotory je její použití nezbytné, protože takto komplikované řízení je mimo dosah dnešních RC souprav. Principiálně lze říct, že je hlavním úkolem řídicí jednotky převod signálů z přijímače na povely pro servomotory ovládající cyklické a kolektivní řízení. Výstup z přijímače je při tom ve formě optimalizované pro řízení běžného vrtulníku s vyrovnávací vrtulkou. Kromě této funkce může řídicí jednotka splňovat další úlohy, jako například napájení servomotorů nebo stabilizaci v případě, že je v jednotce integrován stabilizační systém. Na trhu není mnoho jednotek splňujících požadavky, které na ně vkládá koncepce UAV se dvěma pohonnými jednotkami. Nejlevnějším představitelem je Esky 3 in 1 Mix Controller. Pro naše účely je ale tato jednotka nepoužitelná, jelikož je určena pro modely se dvěma páry koaxiálních rotorů. Příznivější je proto KKMulticopter Flight Controller Blue. Jednotka je postavena na čipu Atmega 168, který umožňuje aktualizaci firmware v budoucnu. Další relativní výhodou je integrovaný tříosý stabilizační systém založený na třech jednoosých gyroskopech, z nichž každý je zvlášť nastavitelný. Bohužel zisk gyroskopů není možné dálkově řídit, což by přineslo těžce řešitelné problémy při přechodu do vodorovného letu. Proto je vhodné použít jednotku, která nemá integrovaný stabilizační systém. Tento požadavek splňuje modul GM 1 firmy Gress Aero. Na jeho těle se nacházejí lože pro umístění piezoelektrických gyroskopů značky GWS. Modul není možno koupit zvlášť, je dodáván pouze ke stavebnicím dodávaným výrobcem. Kromě toho všechny výše zmíněné řídicí

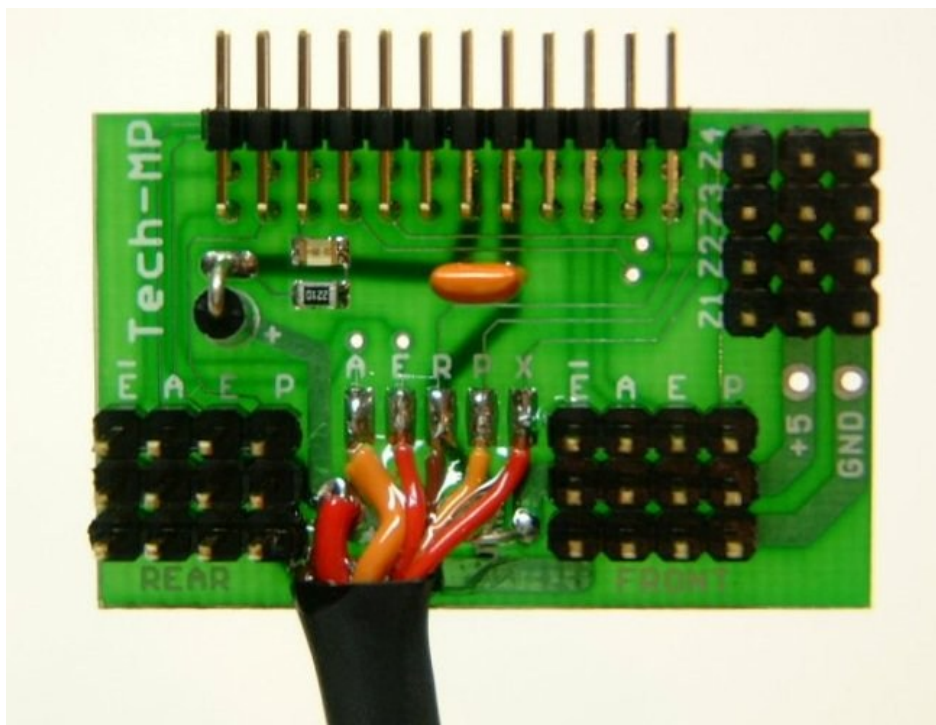
jednotky nesplňují požadavek na způsob ovládání, totiž nepodporují cyklické a kolektivní řízení. Jinak je tomu u palubního procesoru MS 25 české firmy MS Composit, který je primárně určen pro model vrtulníku CH-46 Sea King. Spolupracuje s ovládáním cyklicky CCPM s úhlem 120°. Ke stabilizaci lze použít jakýkoli systém pro moderní vrtulníky a to tak, že se umístí mezi přijímač a řídicí jednotku. Obdobnou filozofii používá i TH-2 GP společnosti Tech Model Products s tím, že pro správnou stabilizační funkci výrobce doporučuje použití jednoosých gyroskopů pro každou osu stabilizace nebo systému Co-Pilot. Jednotka dokáže obstarat ovládání desky cyklicky CCPM se dvěma, třemi nebo čtyřmi servomotory. Snad největší výhodou tohoto výrobku je software Tech Link, který je volně dostupný na internetových stránkách výrobce a umožňuje velmi přesně nastavit řízení vrtulníkových hlav UAV. Pro doladění ovládání během letových zkoušek může být tato možnost velmi užitečná. Propojení s počítačem je provedeno přes rozhraní USB nebo přes sériový port, které jsou umístěny na speciálním přípojném modulu dodávaném k řídicí jednotce.

Částečný závěr

Z těchto důvodů se jeví šestnáctibitová jednotka TH-2 GP (Obr. 2.7) jako neoptimálnější přinejmenším z pohledu letových zkoušek. Při dalším vývoji nebo modifikaci létajícího prostředku také zajišťuje nejširší využití. Její nevýhodou je jedna z nejvyšších cen mezi uvedenými. Jednotka MS 25 je schopna plně zajistit základní funkce řízení při poloviční ceně, proto je v případě výroby více kusů nebo při omezených finančních možnostech použitelná. [12, 16, 17, 19, 24]

Řídicí jednotka	Cena (Kč)
Esky 3 In 1 Mix Controller	455
MS-025	1120
XXcontroller_KR_TwinCopter_v1.5	1800
TH-2 GP	2400
GM-1	2880

Tab. 2.1 Přehled cen řídicích jednotek



Obr. 2.7 Řídicí jednotka TH-2 GP [17]

2.4 Návrh vysílací a přijímací části

Nabídka vysílačů i přijímačů na trhu je velmi široká. Podle parametrů a osobních preferencí si může každý zájemce sestavit soupravu na míru. První volba, kterou je nutné provést je výběr frekvence, na které bude zařízení provozováno. Z důvodu velkého dosahu, odolnosti na rušení a schopnosti obousměrné komunikace mezi vysílačem a přijímačem, což je velmi důležitá vlastnost, bylo zvoleno pásmo 2,4 GHz. Počet kanálů pro řízení je dán množstvím funkcí, které budou na zařízení ovládány. Základní ovládání (klonění, klopení, zatáčení, úhel nastavení listů rotorů) obsadí čtyři kanály, servomotor překlápění rotoru z režimu svislého letu do vodorovného a zpět potřebuje svůj kanál, zvláštní kanál je třeba k nastartování motorů na pracovní otáčky, další dva kanály budou použity pro dálkové řízení zisku gyroskopů. Řízení zisku lze teoreticky zajistit pro oba gyroskopy i jedním kanálem, je ale výhodnější toto provést pomocí dvou kanálů v případě rozdílného nastavení zisku gyroskopů. Z tohoto výčtu vyplývá, že je zapotřebí alespoň sedmikanálová souprava, přičemž k ovládání základních čtyř funkcí je nutné proporcionální ovládání, další funkce lze zajistit dvoupolohovými přepínači, případně tlačítky. Jelikož je často problematické sestavit správně pracující sestavu vysílače a přijímače v pásmu 2,4 GHz od rozdílných výrobců, je vhodné zvolit koupi setu, tzn. sestavy vysílače, přijímače a případně dalších prvků. Zde je zaručena

správná funkce, neboť se jedná nejčastěji o produkty stejného výrobce, kromě toho bývají sety rovněž finančně výhodnější. Pro analýzu byly vybrány nabídky renomovaných značek Futaba, Graupner, Jeti Model a Multiplex. Všechny vyjmenované společnosti nabízejí v setu především osmikanálový (kromě Multiplexu – 7 kanálů) počítačový vysílač s pokročilými funkcemi a odpovídající přijímač. Všechny sety splňují požadavky na ně kladené a jsou pro řízení použitelné. Kromě toho nabízejí možnost jednoduchého zavedení telemetrického systému.

Výrobce	Obsah setu	Cena (Kč)
Jeti	vysílač Graupner MX-16 s modulem Duplex TU2, přijímač Duplex R8, JetiBox, senzor MVario	7300
Multiplex	vysílač Multiplex Cockpit SX M-link, 2x přijímač RX-7	7500
Graupner	vysílač Graupner MX-16, přijímač XR-16 iFS	8500
Futaba	vysílač Futaba T8FG Fasst, přijímač R6008HS	10500

Tab. 2.2 Přehled setů pro vysílací a přijímací část

Částečný závěr

Nejoptimálnější je v tomto případě set od firmy Jeti Model (Obr. 2.8), protože při příznivé ceně kromě vysílače a přijímače nabízí systém Duplex spolu s terminálem JetiBox. Tento systém je v této chvíli jednou z nejlepších možností pro zabezpečení dálkového ovládání v pásmu 2,4 GHz. JetiBox je všestranné zařízení, které spolupracuje s výrobky, které jsou označeny jako JetiBox kompatibilní. Samostatně jej lze použít pro monitorování přijímače a pro nastavení a otestování všech parametrů servomotorů. Pro systém Duplex slouží jako terminál pro nastavení spojení a možností ovládání, které nebyly nastaveny ve vysílači, nebo je nastavit nelze. Díky oboustranné komunikaci se na displeji JetiBoxu zobrazují informace o přijímači a dalších zařízeních, které jsou kompatibilní s JetiBoxem. Možností je také nastavení zvukového varování, když některá hodnota klesne pod nastavenou úroveň. Ve vysílači je již zastavěn modul Duplex TU2, který upravuje signál tak, aby byl ve

formátu systému Duplex. Systém Duplex nabízí bezkrystalový provoz, vysílač a přijímač se spárují pomocí zvolení možnosti párování v JetiBoxu. Pro provoz jsou nutné dvě antény k přijímači, dochází tak k eliminaci stíněných míst. Maximální počet kanálů, se kterými je schopen systém pracovat, je 16, každý se šířkou 5 MHz. Pro maximální dosah a spolehlivost využívá maximální výkon povolený Českým telekomunikačním úřadem 100 mW. Pomocí rozhraní USB lze JetiBox propojit s osobním počítačem pro vyhodnocení uložených dat. Obecně výhodou tohoto setu je okamžitá připravenost k provozu bez dodatečných úprav. Při překlapaní rotorů z polohy pro svislý let do polohy pro vodorovný let si páčky pro ovládání klonění a zatáčení vymění své funkce. Tento problém lze vyřešit správným programováním vysílače a zavedením tzv. režimů. Při stisku jednoho tlačítka pak může dojít k přehození ovládacích kanálů a zároveň překlapaní rotorů. V daném režimu lze také zvolit nastavení zisku gyroskopů, průběhu výchylek a další parametry, které budou nápomocné při ovládání UAV v odpovídajícím módu letu. [13, 20, 24]



Obr. 2.8 Set firmy Jeti Model [13]

2.5 Návrh systému stabilizace

Jak již bylo zmíněno, v dnešní době se jako standard považuje piezoelektrické gyroskopy. Jsou poměrně lehké, dostatečně přesné a díky velkovýrobě je jejich cena podstatně přístupnější než ještě před nedávnem a proto představují nejlepší volbu pro návrh systému stabilizace. Nejdůležitějším parametrem gyroskopu, který je třeba nastavit, je citlivost neboli zisk. Všeobecně se zisk dělí na mechanický a elektronický. Mechanický je dán

částmi, které se nacházejí mimo tělo gyroskopů jako například servomotorem nebo pákou k ovládání rotoru. Elektronický zisk se nastavuje přímo na gyroskopu a to buď ovladačem umístěným na pouzdře zařízení, nebo dálkově z vysílače. Zisk je v podstatě stupeň ingerence gyroskopu do řízení, a čím větší je zisk mechanický, tím menší musí být elektronický. Optimální celková hodnota zisku nastává, když gyroskop rychle a jistě stabilizuje letadlo, ale nedochází ke kmitání, způsobeného příliš velkými zásahy gyroskopu do řízení a neustálého opravování chyb vzniklých z předchozího povelu pro opravu polohy.

Celkově lze do zařízení zabudovat tři gyroskopy pro tři osy otáčení. Nejdůležitější je stabilizace osy zatáčení, zde je vhodné umístit gyroskop s funkcí Heading Hold. Poryvy větru působí na svislé ocasní plochy podstatnou měrou a proto je udržení směru problematické. Funkci Heading Hold lze kdykoli vypnout, například v případě nesprávné spolupráce s řídicí jednotkou. V ose klonění se vyskytuje nepříjemný sklon dvourotorových strojů k nestabilitě, který se projevuje stále narůstajícím kyvadlovým pohybem. Tento pohyb bez zásahu pilota končí překlacením na záda a pádem. Proto je i zde vhodné použít gyroskop, případně model s funkcí Heading Hold. Osa klopení je nejstabilnější, a to natolik, že zde není potřeba stabilizace. Pro potřeby UAV je nezbytné, aby byl zisk řízen dálkově z vysílače, což je případ naprosté většiny gyroskopů dostupných na trhu. Důvodem této nezbytnosti je odlišné ovládání UAV během svislého a vodorovného letu. Při překlacení rotorů pro vodorovný let ovládá kanál vysílače, který byl předtím zodpovědný za klonění zatáčení letadla, a naopak klonění je ovládáno kanálem určeným při svislém letu pro zatáčení. Gyroskop by tak vydával chybné povely a letadlo by se stalo neovládatelným. Proto je nutné při přechodu do vodorovného letu nastavit zisk gyroskopů na nulovou hodnotu, tím se budou chovat, jako by nebyly v systému řízení přítomny. Stabilita pak bude zajištěna aerodynamickými prostředky.

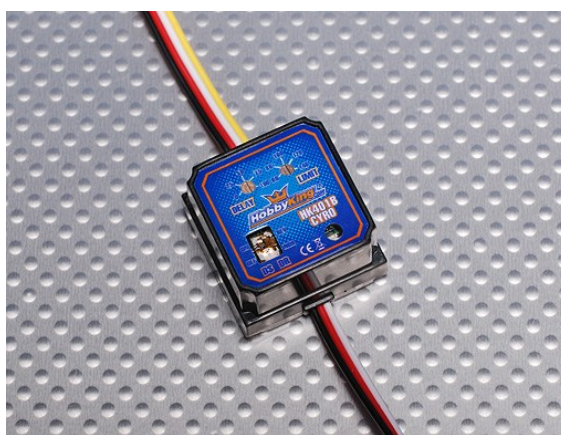
Byly vybrány tři gyroskopy různých výrobců, které splňují dané požadavky a jsou v podobných cenových hladinách. Jsou to Assan GA-410, Hobby King 401B, a Turnigy 302. Tyto gyroskopy mají velmi podobné vlastnosti a záleží na preferovaných hlediscích.

Model	Hmotnost (g)	Cena (Kč)
Hobby King 401B	27	250
Turnigy 302	48	500
Assan GA-410	15	550

Tab. 2.3 Přehled gyroskopů

Částečný závěr

Jako nejlepší se jeví Hobby King 401B (Obr. 2.9), který splňuje požadavky Heading Hold (zde AVCS) i dálkově řízeného zisku. Důvodem nízké ceny je masová produkce, důvodem kvality původ konstrukce, který má své kořeny v gyroskopu Futaba 401. Tento model byl velmi oblíbený pro svou jednoduchost a spolehlivost, výrobce před časem ale zastavil výrobu. Firma Hobby King ji převzala a za podstatně nižší cenu nabízí svým zákazníkům tytéž výhody. Ohlasy uživatelů na tento gyroskop jsou v internetových zdrojích velmi pozitivní, proto lze předpokládat, že bude dostatečně spolehlivý pro použití na UAV. [10, 24, 26]



Obr. 2.9 Gyroskop Hobby King 401B [24]

2.6 Návrh servomotorů

Vhodná volba servomotorů je důležitá pro ovladatelnost UAV. Pro ovládání směrového a výškového kormidla lze použít analogové servomotory. Prvky, které pozitivně ovlivňují přesnost a životnost, jsou kovové převody a uložení v kuličkovém ložisku. Jiným faktorem ovlivňujícím výběr je síla servomotoru. Když je příliš nízká, nedokáže zajistit ovladatelnost, při předimenzování zbytečně dochází k nárůstu hmotnosti a ceny. Z tohoto hlediska byly po krátkém průzkumu zvoleny mikroserva Hitec HS-125MG (Obr. 2.10), které budou použity ve dvou kusech. Díky ploché konstrukci a nízké hmotnosti 24 g jsou velmi kompaktní a při tahu 3 kg/cm dostatečně výkonné pro ovládání. Navíc se již osvědčily v roce 2010 při stavbě UAV na VŠB-TUO. Jejich cena je 749 Kč.



Obr. 2.10 Servomotor HS-125MG. Zdroj: <<http://www.servocity.com>>

Pro mechanismus překlápění hřídele z polohy svislého letu do vodorovného a zpět je pro plánovanou velikost UAV nutno použít víceotáčkový servomotor, který bude spojen se šroubovicí. Servomotory tohoto typu jsou určeny pro modely plachetnic jako navijáky pro lanko od plachty. V této kategorii se největší oblibě těší výrobky firmy Hitec. Vhodným modelem je HS-785 (Obr. 2.11) s hmotností 110 g a cenou 900 Kč. Je schopen vykonat 4 plné otáčky, přičemž každá trvá při napětí 5 V asi 1,6 vteřiny. Servomotor je schopen vyvinout velký moment, v konstrukci bylo použito uložení ve dvou kuličkových ložiskách.



Obr. 2.11 Servomotor HS-785. Zdroj: <<http://www.servocity.com>>

Pro svislý let je nutné ovládání dvou desek cykly, které jsou typu CCPM (tři servomotory s úhlem 120° mezi nimi). Jelikož je řízení zajišťováno řídicí jednotkou se stabilizací gyroskopy, je nutná rychlá a přesná odezva servomotorů. Proto se doporučuje použití digitálních servomotorů. Do výběru je vhodné zařadit servomotory určené přímo k ovládání kolektivu velikosti 500, tím jsou zajištěny odpovídající parametry výrobku. Zde lze zmínit Hotgear D251 MG, Hitec HS-5245 MG nebo NEXUS DSW 414 MG. Velikostně se jedná o miniserva.

Částečný závěr

Všechny zmíněné servomotory splňují požadavky a liší se pouze v detailech. Použit bude servomotor společnosti Hitec (Obr. 2.12) s cenou 999 Kč a hmotností 32 g, především pro unifikaci výrobce servomotoru na letadle, ale také kvůli dobré pověsti výrobků této firmy. [10, 20, 24]



Obr. 2.12 Servomotor HS-5245MG. Zdroj: <<http://www.servocity.com>>

2.7 Návrh napájení palubní elektroniky

Pohon UAV je zajištěn elektromotory. Toto řešení umožňuje více možností pro napájení. Jako nejjednodušší koncepce se nabízí využití stabilizátoru napětí BEC. Převážně u nich lze nastavit hladinu napětí, takže je elektronika napájena požadovaným napětím. Výhodou je také nízká hmotnost zařízení. Při použití dvou nezávislých akumulátorů pro motory vzniká ale problém nerovnoměrného vybíjení toho, ke kterému je BEC připojen. Při vybití akumulátoru je navíc paralyzován systém řízení a UAV se stává neovládatelným. Tímto je i z hlediska zálohování výhodnější použití zvláštního akumulátoru pro napájení palubního elektronického vybavení. Týmž akumulátorem může být napájeno případné užitečné zatížení.

BEC bude taktéž v systému přítomen, protože je třeba stabilizovat výstupní napětí z akumulátoru, aby nebyly poškozeny elektronické prvky choulostivé na změny napájecího napětí, jako např. řídicí jednotka, která vyžaduje stabilních 5 V. Jelikož jsou vlastnosti stabilizátorů různých výrobců obdobné, bude použit spolehlivý výrobek firmy Jeti Model Max Bec (Obr. 2.13). Pro napětí 5 V dokáže zajistit stabilní proud 2,92 A při minimálním vlastním odběru. Vstup může být jak z niklových tak z lithiových akumulátorů, kdy pro první ze jmenovaných je potřeba pět nebo šest článků, pro druhý články dva. Stav napětí článků je indikován třemi zelenými a jednou červenou LED. Díky použití stabilizátoru je rychlost analogových servomotorů konstantní během vybíjení akumulátoru. Cena stabilizátoru Max Bec je 650 Kč. [10, 13]



Obr. 2.13 Stabilizátor Max Bec [13]

Jako běžný zdroj energie pro elektroniku v modelech se používá článků NiCd nebo NiMH. Jsou robustní a spolehlivé, ale těžké, což je v tomto případě rozhodující faktor. Proto je vhodnější zvolit modernější lithiové akumulátory. Mezi nimi se jako nejlepší jeví články Li-Pol, které jsou považovány za nejpokrokovější technologii a označovány jako velmi perspektivní zdroje. Mezi jejich přednosti patří velmi nízká hmotnost a rozměry, vysoké poskytované proudy a dlouhá životnost při dodržování provozních doporučení. Kromě toho se u nich nevyskytuje paměťový jev, takže je lze nabíjet bez předchozího úplného vybití a mají velmi nízké samovybití. Jako neduhy se uvádí křehkost, snížení kapacity při nižších teplotách, větší vnitřní odpor, mírně delší dobu nabíjení s tím, že jsou při nabíjení citlivé na hodnotu proudu. Jeden článek má napětí 3,7 V, takže pro dostačující napájení palubních spotřebičů bude potřeba dvoučlánekový akumulátor. Odhadovaná dostatečná kapacita akumulátoru je 2000 mAh. Tato hodnota zajistí bezpečnou rezervu. Pro analýzu byly vybrány výrobky G2 GOLD RAY Li-Pol (125 g, 599 Kč; Obr. 2.14), PolyQuest 2200XP (120 g, 799 Kč) a Bionic LiPol Flight (130 g, 799 Kč), všechny dvoučlánekové s kapacitou 2200 mAh. [20, 24]

Částečný závěr

Jako nejvhodnější byl zvolen akumulátor G2 GOLD RAY. Kromě nejnižší ceny nabízí rovněž funkci „bleskurychlého nabíjení“ proudem až 13,2 A, maximální odběr je 79 A.

Akumulátor	Hmotnost (g)	Cena (Kč)
G2 GOLD RAY	125	599
PolyQuest 2200XP	120	799
Bionic Lipol Flight	130	799

Tab. 2.4 Přehled akumulátorů



Obr. 2.14 Akumulátor G2 GOLD RAY [20]

3 NÁVRH A ČÁSTEČNÁ REALIZACE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Pro správnou funkci celého řídicího systému je nutné provést vhodné zapojení řídicích prvků do obvodu řízení. Řídicí systémy lze v zásadě rozdělit na dvě hlavní skupiny. Jsou to systémy s otevřenou nebo s uzavřenou smyčkou. V případě navrhovaného řídicího systému se jedná o systém se zpětnou vazbou, tedy s uzavřenou smyčkou. Zpětná vazba je zajištěna jednak systémem stabilizace, jednak samotným operátorem, který pomocí zrakové kontroly a případně výstupů z telemetrického systému vyhodnocuje odchylku akční veličiny od požadované hodnoty. Jinak řečeno koriguje svými zásahy do ovládání vnější i vnitřní vlivy, které způsobují přechod UAV do jiného režimu či polohy, než je zamýšlený. Systém telemetrie dokáže zajistit důležité údaje o stavu letu. Díky použité technologii přenosu signálu lze velmi jednoduše provést zapojení popsaných telemetrických senzorů. Částečná realizace představuje praktické předvedení řídicího systému v zjednodušené podobě pro ověření správnosti navržených řešení. [1, 13]

3.1 Návrh sestavení systému řízení letu

Vstupem pro řízení je osmikanálový vysílač Graupner MX 16. Ten posílá řídicí signály na frekvenci 2,4 GHz skrz vysílací modul Jeti Duplex TU-2 do spárovaného osmikanálového přijímače Jeti Duplex R8. Jelikož lze ve vysílači přiřadit každému kanálu libovolnou funkci, může být rozvržení kanálů libovolné. Pro zjednodušení lze přiřadit základní ovládání prvním čtyřem kanálům, přičemž se v literatuře pro řídicí jednotky zvoleného typu běžně používá název kanálů podle řídicích ploch klasického letounu. Tímto je přiřazení (viz také Obr. 3.2):

- kanál 1 – křidélka,
- kanál 2 – výškové kormidlo,
- kanál 3 – směrové kormidlo,
- kanál 4 – úhel listů rotorů,
- kanál 5 – překlápění rotorů,
- kanál 6 – zisk gyroskopu stabilizace v příčné ose,
- kanál 7 – zisk gyroskopu stabilizace v kolmé ose,
- kanál 8 – stabilizace otáček motorů pro pohon rotorů.

Čísla kanálů ve vysílači odpovídají číslům kanálů na přijímači. Přijímač je přes stabilizátor Max Bec napojen na zdroj palubní elektroniky, akumulátor G2 GOLD RAY Li-Pol.

Na výstupu z kanálu 1 se vodič rozděluje na dvě větve pomocí V kabelu. Jedna směřuje k servomotoru Hitec 125 MG, který ovládá směrové kormidlo, druhá je vedena ke gyroskopu HK 401 B určenému pro stabilizaci příčné osy a dále přes hlavní přívodní vodič k řídicí jednotce TH-2 GP. Hlavní vodič je kromě toho napojen na stabilizátor Max Bec, který tímto napájí řídicí jednotku.

Výstup z kanálu 2 je taktéž rozdělen na dvě větve, z nichž jedna vede přímo k servomotoru Hitec 125 MG, který zajišťuje ovládání výškového kormidla. Druhá je napojena přímo na řídicí jednotku přes zelený konektor.

Výstupní signál z třetího kanálu je veden přes gyroskop HK 401 B, určené ke stabilizaci kolem kolmé osy, k řídicí jednotce skrz modrý konektor.

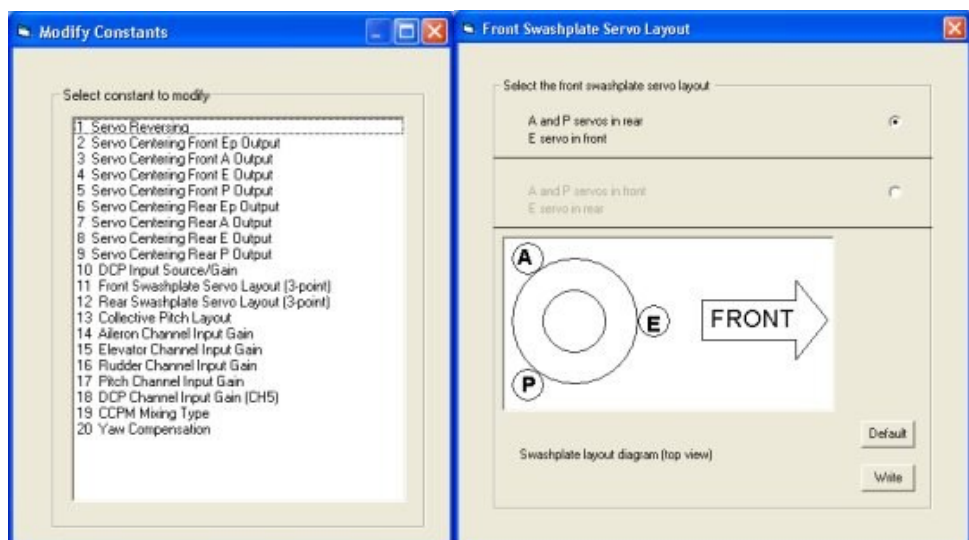
Ke zbývajícimu žlutému konektoru řídicí jednotky se přímo připojuje vodič od kanálu č. 4.

Z pátého kanálu je signál veden k servomotoru HS-785.

K výstupům kanálů 6 a 7 jsou připojeny jednotlivé gyroscopy.

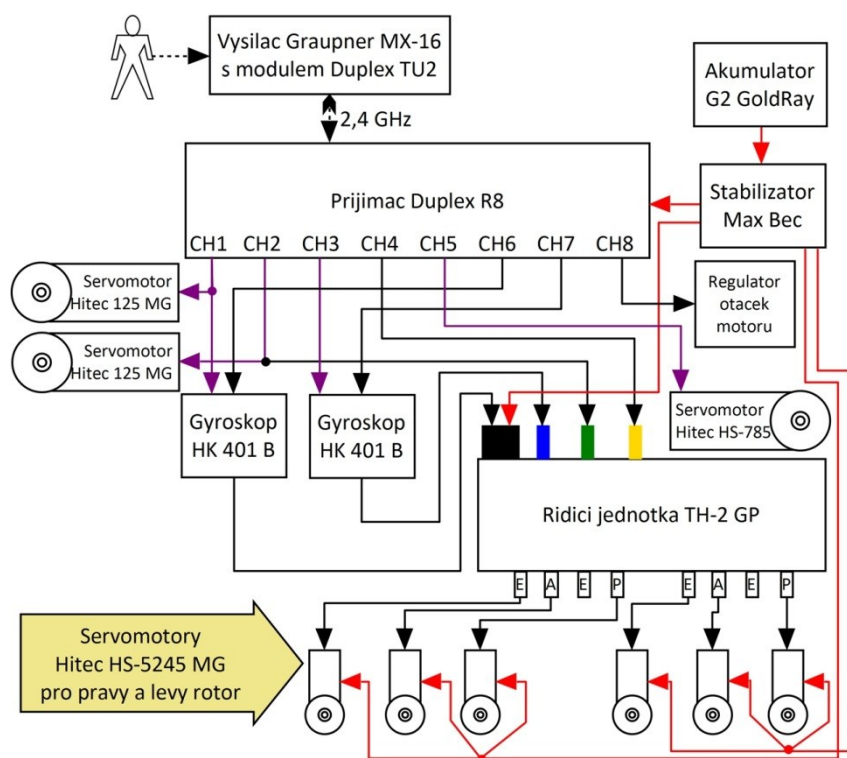
Kanál 8 je přiveden k regulátoru otáček pohonných jednotek. Regulátor zajišťuje konstantní otáčky během všech letových režimů.

Výstupem z řídicí jednotky je celkem osm konektorů, po čtyřech pro každou hlavu. Použity budou vždy jen tři z nich pro servomotory Hitec HS-5245 MG. Na těle řídicí jednotky jsou konektory označeny ve sledu Ě, A, E, P. Označení Ě je zde umístěno pro odlišení od konektoru E při ovládání hlavy pomocí čtyř servomotorů, jedná se o konektory pro servomotory umístěné souběžně s osou letadla. K servomotorům budou vedeny vodiče z konektorů Ě, A a P, jelikož je Ě označen v popisu jako přednostní konektor. Toto zapojení platí pro obě rotorové hlavy. Nastavení umístění servomotorů ovládaných skrz jednotlivé konektory se provede programem TechLink (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 Nastavení řídicí jednotky pomocí programu TechLink [17]

Servomotory budou rovněž připojeny ke stabilizátoru Max Bec jako ke zdroji napětí a to tak, že bude veden vodič od stabilizátoru, který se těsně před rotorovou hlavou rozdělí na tři větve, které zajistí napájení každého servomotoru zvlášť. Toto řešení musí být použito z důvodu velkého průměru rotorů a potažmo natolik velkého odběru servomotorů, že řídicí jednotka není schopna zajistit jejich napájení.



Obr. 3.2 Návrh řídicího systému

(černé vodiče znamenají řídicí signál, červené napájení, fialové řídicí signál i napájení)

Položka	Množství	Jednotková cena (Kč)
Set přijímač-vysílač	1	7 300
Řídicí jednotka TH-2 GP	1	2 400
Akumulátor G2 GoldRay	1	599
Stabilizátor Max Bec	1	650
Gyroskop HK 401 B	2	250
V kabel	2	80
Vodiče		350
Celkem		11 959

Tab. 3.1 Náklady na řídicí systém

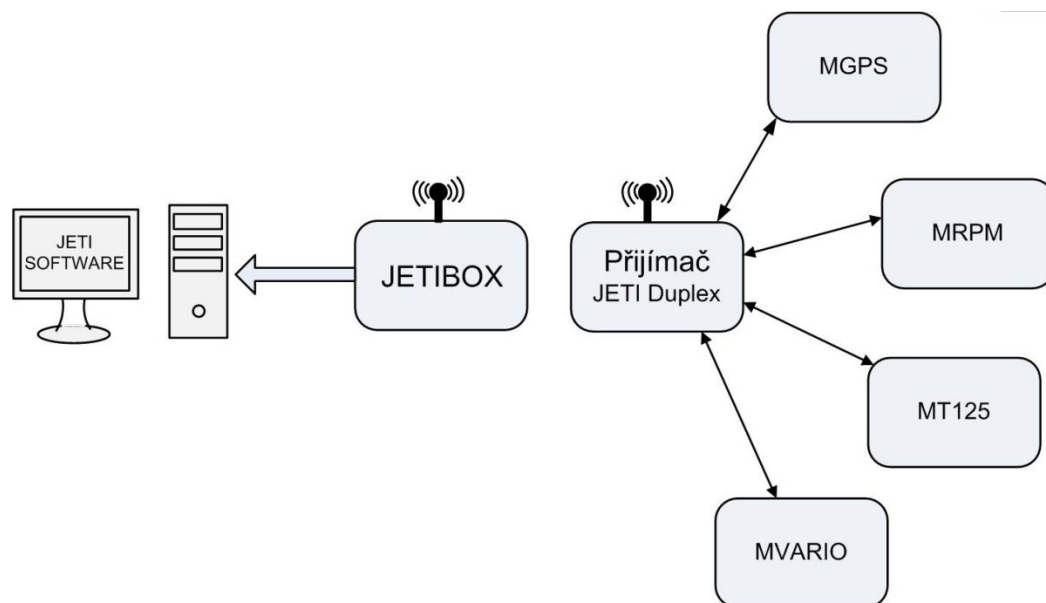
V nákladech na řídicí systém (Tab. 3.1) byly uvedeny komerční ceny. Po dohodě s dodavatelem lze tyto ceny snížit o cca 10 %. Za předpokladu získání sponzoringu od výrobců, kteří mají zájem na inovativním využití jejich výrobků, je možné ještě podstatněji náklady snížit. [13, 16, 20, 24]

3.2 Návrh systému telemetrie

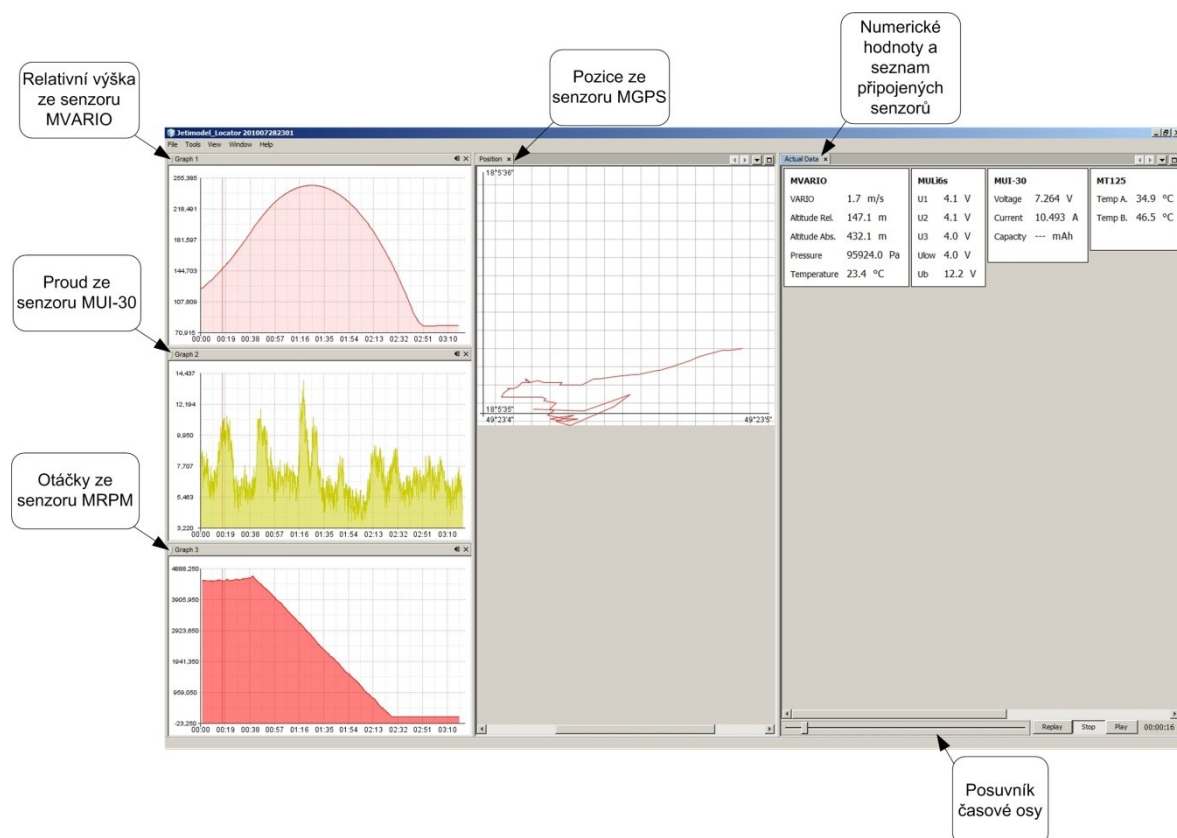
Díky systému telemetrie lze na dálku zjišťovat letové údaje. Pro tento účel jsou potřeba specializované vstupy. Díky tomu, že systém Duplex, který byl navržen pro použití v UAV, dovoluje obousměrnou komunikaci mezi vysílačem a přijímačem (Obr. 3.3), stačí tyto vstupy připojit k přijímači a přenos informací probíhá na frekvenci 2,4 GHz. Firma Jeti Model nabízí jednoduché řešení systému telemetrie ve formě měřících senzorů. Ty jsou kompatibilní s JetiBoxem, který slouží jako výstup pro uživatele. Sensory se připojují do zvláštního vstupu přijímače, označeného Ext. Pro připojení více senzorů je třeba použít rozšiřující modul Duplex Expander E4 s cenou 690 Kč, který se zapojí do zmíněného vstupu a lze k němu připojit až čtyři vybrané senzory. Data lze dále zpracovávat v osobním počítači (Obr. 3.4), jelikož jsou ukládány na paměťové kartě. Pro UAV s kolmým vzletem a s elektropohonem jsou použitelné a užitečné pouze některé senzory z nabídky uvedené společnosti.

- **MGPS** – je modul pracující díky družicovému systému GPS. Udává informace o vzdálenosti od nastaveného místa, výšce, potažmo rychlosti, kurzu a uražené vzdálenosti. Data jsou zobrazována na LCD JetiBoxu podle volby uživatele a kromě toho se ukládají do paměti, která může mít kapacitu 4 nebo 8 MB. Verze s větší pamětí umožňuje nepřetržitý záznam po dobu 18 hodin při frekvenci zápisu dat jednou za vteřinu. Informace lze pak převést do osobního počítače pro další analýzu. Dále pak poskytuje modul možnost jednoduchého monitorování jednoho spotřebiče (např. regulátoru motoru), zaznamenává se délka vstupního impulsu, takže pouze stav zapnut/vypnut. Pro správnou funkci modulu je třeba, aby bylo pět dostupných GPS satelitů. Cena senzoru je 2 490 Kč.
- **MSPEED** – měří indikovanou vzdušnou rychlost (IAS). K elektronické jednotce je připojena pitotova trubice, rychlost je vyhodnocena stejně jako běžně v letectví z rozdílu celkového a statického tlaku. Nastavením požadovaných hodnot v km/h, mph nebo m/s, může JetiBox zvukově upozorňovat na překročení nebo přiblížení se k mezním rychlostem. Cena je 1 590 Kč.
- **MVario** – nabízí měření relativní výšky, stoupání a klesání. Stejně, jako u předchozích senzorů, je možné nastavení zvukového signálu, který je pro stoupání ve formě krátkých přerušovaných tónů a pro klesání dlouhých přerušovaných tónů. Údaje o výšce a stoupání či klesání se zobrazují na displeji JetiBoxu. Nejužitečnější jsou tyto údaje pro létání s bezmotorovými modely. Náklady na pořízení tohoto senzoru jsou 1 490 Kč.
- **MUI** – vyskytuje se v provedení 30, 50, 75, 150 a 200. Senzory jsou určeny pro měření napětí, vyčerpané kapacity a proudu akumulátorů. Označení odpovídá právě nejvyšší hodnotě měřeného proudu. Opět lze kromě zobrazení údajů na JetiBoxu nastavit alarmy pro jednotlivé hodnoty napětí, kapacity i proudu. Zvláštním provedením je MULi6s, který je určen k monitorování napětí lithiových baterií maximálně se šesti články. Jeho cena je 750 Kč, MUI stojí 690 až 1 150 Kč podle provedení. Jinou možností je zastoupení Max Becu verzí Max Bec 2D, který může rovněž pracovat jako telemetrické zařízení a pomocí systému DUPLEX předávat data do vysílače. Cena této verze je 1 850 Kč.
- **MT** – slouží k měření teploty. Podle potřebného maxima lze zakoupit verzi 125 nebo 300, kde číselné označení znamená maximální měřenou teplotu ve stupních Celsia. Obě verze obsahují dvě čidla. Modul je určen k měření teploty motorů, regulátorů, akumulátorů a dalších prvků choulolistivých na teplotu. Cena je 790 Kč pro MT 125, resp. 890 Kč pro MT 300.
- **MRPM AC** – je určen k měření otáček výhradně střídavých (BLDC) motorů. Připojuje se k libovolným dvěma fázím motoru. Kromě měření otáček v min^{-1} zobrazuje výkon vrtule

(či rotoru) ve wattech a zaznamenává minima a maxima obou parametrů. Lze nastavit alarm jak pro příliš vysoké tak i nízké hodnoty. Cena tohoto senzoru je 690 Kč. [13]



Obr. 3.3 Schéma systému telemetrie [13]



Obr. 3.4 Vyhodnocení záznamu telemetrických dat pomocí specializovaného programu [13]

Jinou variantou je použití telemetrického systému, který byl vyvinut na VŠB-TUO v roce 2010 a jeho další vývoj. Tímto systémem se zabývá diplomová práce Ing. Davida Schwarze *Využití bezpilotních létajících prostředků pro telemetrické účely – telemetrický systém* [4]. Při použití prvků řízení, které byly použity v roce 2010 a prvků navrhovaných v této práci, lze stávající systém zdokonalit. Jedná se o systém přenosu obrazu v reálném čase s možností snímkování. Jelikož je k dispozici šestikanálová RC sestava, popsána v diplomové práci Ing. Bronislava Klimánka *Využití bezpilotních létajících prostředků pro telemetrické účely – návrh letadla* [5], lze ji v této chvíli použít k jiným účelům. Na trhu jsou dostupné speciální nosiče kamer pro UAV. Existují v několika provedeních pro různé druhy létajících zařízení a s různými parametry. Pro účely navrhovaného UAV je vhodný pohyblivý nosič. Pomocí servomotorů lze natáčet plošinu s fotoaparátem či kamerou pro dosažení vhodnějších záběrů. Nosič se montuje nejčastěji na lyžiny stávajícího podvozku. Zdařilým reprezentantem je zde ALware FlyCam Stand V2 (Obr. 3.5) s vlastní váhou 205 g a cenou 900 Kč. Jeho velkou výhodou je použití dvou servomotorů (Obr. 3.6) pro pohyb ve dvou osách. Zajímavou možností je rovněž použití gyroskopů ke stabilizaci plošiny. Ty se zapojí mezi přijímač a servomotory. Nosnost samotného nosiče je udávána na 1 kg. Při použití RC soupravy, která je k dispozici, bude ovládat plošinu i fotoaparát druhý operátor. Systém snímkování pomocí jednoho servomotoru zůstává stejný, jelikož je souprava šestikanálová, dodatečně přibývá možnost použití dalšího servomotoru pro ovládání funkce zoom. Napájení je zajištěno stabilizátorem Max Bec. [26]



Obr. 3.5 Nosič ALware FlyCam Stand V2 s HD kamerou na plošině [26]



Obr. 3.6 Umístění servomotorů pro pohyb plošinou [26]

Částečný závěr

Spojením obou popisovaných systémů lze navrhnout poměrně výkonnou sestavu zpětné vazby. Jelikož lze k modulu Duplex Expander připojit maximálně čtyři senzory, je třeba zvolit, které údaje jsou pro let nejpotřebnější. Z vyjmenovaných byly vybrány senzory MVario, MSPEED, MGPS a MUI. Senzor MRPM AC není v tomto projektu stěžejní, protože jsou otáčky udržovány na konstantní hladině pomocí regulátoru otáček. Jelikož se nepočítá s vysokými teplotami během provozu, rovněž senzor MT zde nenajde velké uplatnění. Prvkem, který se nejvíce zahřívá, je vysílač systému přenosu obrazu v reálném čase. Ochrana před přehřátím musí být zajištěna vhodným umístěním a odvodem tepla. Díky použití nejnovější verze přenosu od firmy Jeti Model může být výstupem z celého systému obraz na monitoru počítače, kdy se vedle sebe zobrazují letové údaje ze senzorů (jako na Obr. 3.4) a záběry z fotoaparátu, vše v reálném čase.

3.3 Částečná realizace

Pro částečnou realizaci projektu byla z finančních důvodů zpracována zjednodušená verze UAV. Ta nesplňuje předem dané požadavky na výdrž a nosnost, ale má ověřit navržená řešení v praxi. Rozdílem viditelným na první pohled jsou podstatně menší rozměry a díky tomu i nižší hmotnost. Z pohledu řídicího systému to znamená použití menších a tím i levnějších výkonových prvků. Zjednodušením je rovněž práce s menšími hodnotami proudu.

3.3.1 Použité prvky

Vysílací a přijímací část je totožná s prvotním návrhem. Jedná se tedy o osmikanálový vysílač Graupner MX-16 s modulem Duplex TU2 a terminálem JetiBox a přijímač Duplex R8. Jako řídicí jednotka byla zvolena MS-025 od firmy MS Composit. Gyroskopy byly zakoupeny jako komplet s řídicí jednotkou, jedná se o MS-024 s dálkově řízeným ziskem od

stejného výrobce. Menší UAV si vystačí s méně výkonnými servomotory. Byly zvoleny servomotory stejného výrobce jako v původním návrhu, tedy firmy Hitec. Pro ovládání rotorů i ocasních ploch jsou použity shodné servomotory velikosti mikro HS-55. Jedná se o spolehlivý typ, který se s cenou 250 Kč řadí mezi nejprodávanější ve své kategorii. Při nízké hmotnosti 8 g dosahuje tahu 1,3 kg/cm. Pro překlápění rotorů je použita jiná koncepce než původně. Díky menšímu zatížení není potřeba používat šroubovici, pro předpokládané síly stačí servomotor napojený přes vhodnou páku. Zvolený servomotor je HS-225BB s tahem 4,8 kg/cm a hmotností 27 g. Díky menším proudovým odběrům servomotorů není potřeba do systému řízení zahrnovat zvláštní energetický okruh. Napájení je zajištěno z regulátoru otáček motoru SPIN 33 se zabudovaným stabilizátorem BEC. Zdrojem je jediný akumulátor, který je společný pro pohon i napájení elektronického vybavení. Příjímač je uzpůsoben pro rozvádění proudu a napájí jak servomotory pro pohon ocasních ploch a překlápění nebo gyroskopy, tak řídicí jednotku a skrz ni i servomotory na rotorových hlavách. [16, 20, 24]

3.3.2 Sestavení systému řízení

Systém řízení realizovaného UAV ve svém principu odpovídá systému navrhovanému. Vysílací a přijímací část zůstala nezměněna. Pro jednodušší nastavení byla čísla kanálů ponechána, jak jsou výchozí při zapojení vysílače v módu H1. Zapojení je na Obr. 3.7.

Napájení zajišťuje stabilizátor BEC integrovaný v regulátoru SPIN 33. Ten je připojen ke kanálu číslo 6 přijímače. Komunikace zde probíhá obousměrně, tímto kanálem je zajištěno také ovládání motorů.

Z kanálu číslo 1 na přijímači, který ovládá úhel nastavení listů rotorů, vede přímo do konektoru č. 2 řídicí jednotky a má černé značení.

Signál z kanálu č. 2 je veden přes gyroskop MS-024 červeně značeným vodičem do konektoru č. 4 řídicí jednotky.

Vodič od třetího kanálu, který vede signál pro ovládání klopení, je rozdělen pomocí V kabelu do dvou větví. Jedna směřuje přímo do servomotoru HS-55 pro ovládání výškového kormidla, druhá vodičem s modrým značením směřuje do konektoru č. 6 v řídicí jednotce MS-025.

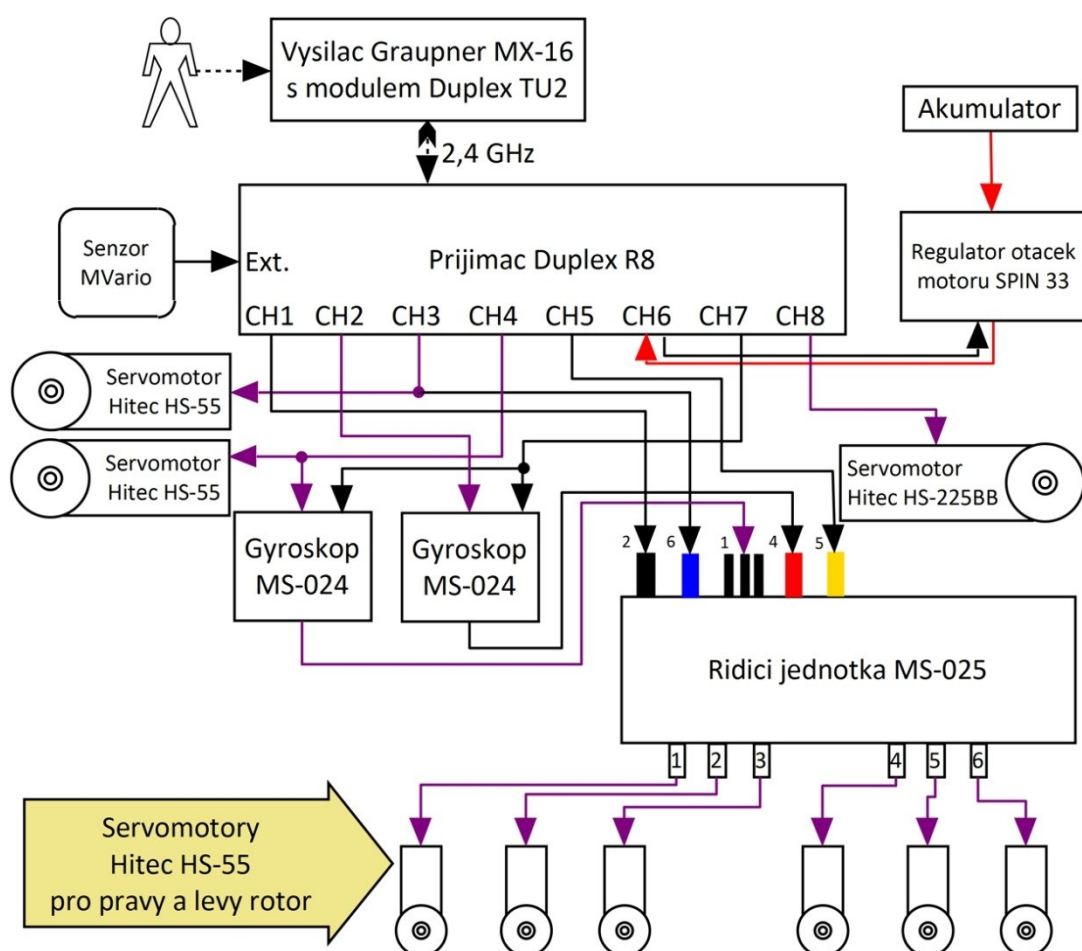
Na výstupu z kanálu č. 4 se opět nachází V kabel. Signál je veden do servomotoru směrového kormidla a do gyroskopu. Gyroskop je s konektorem č. 1 řídicí jednotky propojen pomocí třížilového kabelu. Ten zajišťuje také napájení jednotky.

Pátý kanál je určen pro trimování, tedy vyvážení neutrálních poloh servomotorů ovládajících rotorovou hlavu. Z přijímače je signál veden k řídicí jednotce žlutým vodičem do konektoru s číslem 5.

Pomocí kanálu č. 7 je ovládán zisk obou gyroskopů. Pomocí V kabelu je tentýž signál veden k oběma gyroskopům.

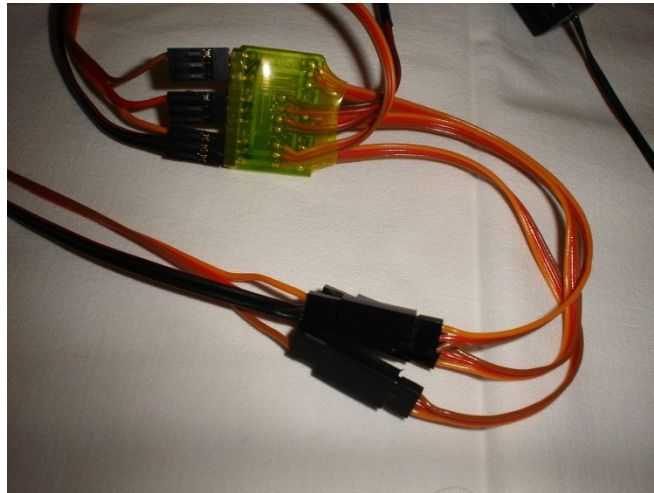
Kanál č. 8 je vymezen pro ovládání překlápění rotorů. Proto je signál veden přímo k servomotoru HS-225BB, který přes páku ovládá celý mechanismus překlápění.

Na výstupu z řídicí jednotky se nachází šest konektorů pro připojení jednotlivých servomotorů ovládajících rotorové hlavy (Obr. 3.8). Konektory 1, 2 a 3 jsou použity pro pravý rotor; 4, 5 a 6 pro levý motor. Prostřední konektory (č. 2 a 4) jsou určeny pro přední servomotory, konektory s nejnižším číslem (č. 1 a 4) pro pravé servomotory, konektory s nejnižším číslem (č. 3 a 6) pro levé servomotory.



Obr. 3.7 Zapojení realizovaného systému řízení

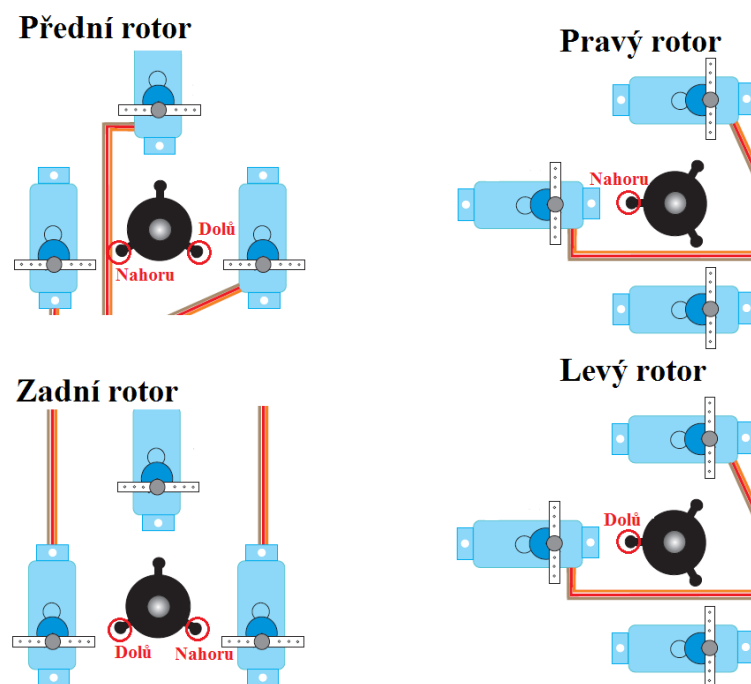
(černé vodiče znamenají řídicí signál, červené napájení, fialové řídicí signál i napájení)



Obr. 3.8 Řídicí jednotka a její výstupy

3.3.3 Postup realizace

Servomotory byly nejprve jednotlivě odzkoušeny pomocí servotesteru. Jelikož byly plně provozuschopné, bylo zahájeno vlastní sestavování systému. Prvně bylo nutné vyzkoušet ovládání rotorových hlav. Pro zjednodušení nebyly do systému zařazeny gyroskopy a zapojeny byly pouze první čtyři kanály. Cílem bylo dosáhnout správných reakcí rotorových hlav při daných výchylkách pákových ovladačů na vysílači. Vysílač byl spuštěn v režimu H1 pro vrtulník (jeden servomotor desky cykliky) a byly provedeny pouze základní nastavení vysílače. Jelikož docházelo k nesprávným reakcím, byla provedena úprava umístění servomotorů ovládajících desku cykliky. Po této úpravě již reakce odpovídaly povelům. Problémem, který se dále vyskytl, byla neschopnost desky cykliky vychýlit se správně pro uvedení UAV do zatáčky kolem kolmé osy. Bylo to způsobeno odlišným umístěním servomotorů ovládajících výchylky cyklického řízení pro naše UAV, které má rotory v poloze vedle sebe v porovnání s tandemovým vrtulníkem, kterého rotory jsou v poloze za sebou (Obr. 3.9).



Obr. 3.9 Provedení otáčení doprava kolem kolmé osy pomocí rotorových hlav CCPM
v provedení tandem (vlevo) a při uspořádání rotorů vedle sebe (vpravo) [16]

Nastavení pro toto uspořádání by nebylo problémem při použití původně navržené jednotky TH-2GP, u které by bylo možné provést veškeré modifikace v programu TechLink. Konstrukce UAV byla navrhována pro tuto řídicí jednotku. Možným řešením by bylo umístění servomotorů shodně s tandemovým vrtulníkem, pouze pootočením o 90° v kolmé ose. Změnily by se pouze čísla kanálů řídících jednotlivé funkce. Přestavba by ale byla časově náročná. Druhou možností bylo přeprogramování řídicí jednotky, což dokáže provést pouze výrobce. Bylo zvoleno toto východisko, výrobce byl kontaktován a proběhla vstupní výměna informací. V době psaní těchto řádků ale není modifikace provedena, proto nejsou reakce rotorových hlav na povely zatáčení správné.

Dále bylo provedeno zapojení jako na Obr. 3.7. Jelikož jsou ve výchozím nastavení vysílače některé funkce již přiřazeny jednotlivým kanálům, byly tyto funkce zapojeny tak, aby byla změna nastavení minimální. Bylo provedeno přidělení ovládačů jednotlivým kanálům. Pro kanál č. 6 a ovládání otáček motoru to byl přepínač SW 1, pro kanál č. 7 a ovládání zisku gyroskopů přepínač SW 2 a pro kanál č. 8 a překlápění rotorů proporcionální ovládač Ctrl 7. Nastavení vysílače je na Obr. 3.9.



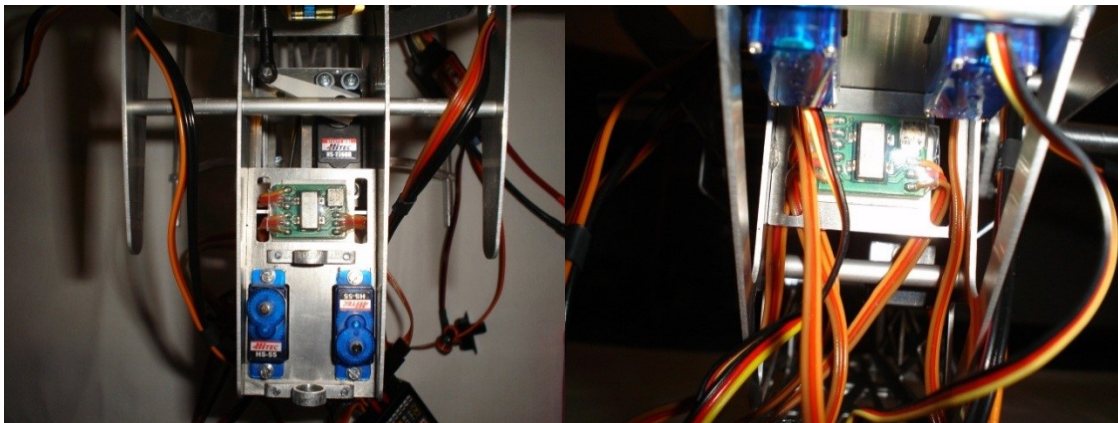
Obr. 3.9 Přiřazení ovladačů kanálům

Pro udržení stabilních otáček motoru byl regulátor SPIN 33 připojen k JetiBoxu (Obr. 3.10), na kterém bylo provedeno nastavení režimu „governor“ a volba nejnižších možných otáček 1050 min^{-1} pro testovací účely.



Obr. 3.10 Regulátor SPIN 33 připojen k terminálu JetiBox

Zisk gyroskopů byl nastaven podle doporučení výrobce na 40 % pro svislý let, při přepnutí přepínače na vodorovný let je zisk gyroskopů nulový (viz Obr. 3.9). Gyroskopy byly umístěny na pružných podložkách pro zmírnění vlivu vibrací a přesně v osách, které mají stabilizovat. Umístění je na Obr. 3.11, kde jsou kromě samotných gyroskopů viditelné servomotory výškového a směrového kormidla a část servomotoru pro překlápění rotorů.



Obr. 3.11 Detail umístění gyroskopů. Vlevo pohled shora, vpravo pohled zezadu.

Byl rovněž odzkoušen senzor MVario, který je součástí setu RC soupravy. Po připojení do vstupu Ext. bylo možné na panelu JetiBoxu prohlížet hodnoty relativní výšky, stoupání/klesání, tlaku a okolní teploty (viz Obr. 3.12). Byl taktéž odzkoušen zvukový systém s varováním o prudkých změnách výšky. Senzor pracoval s velkou přesností 0,2 m/s.

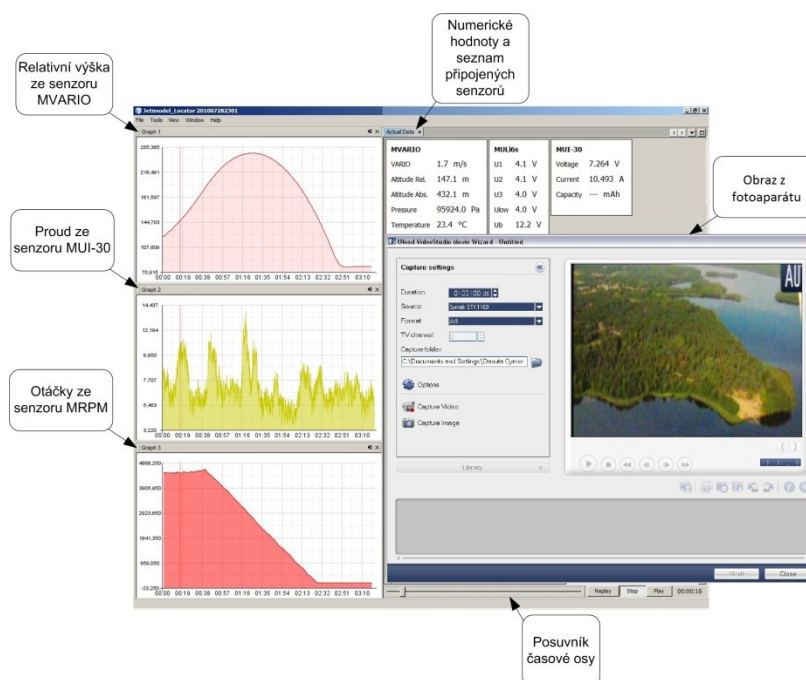


Obr. 3.12 Senzor MVario a údaj na displeji JetiBoxu

Po provedení těchto úkonů byl UAV se sestaveným řídicím systémem předán k celkovému dokončení a finálním úpravám. [13, 16, 17]

System zpětného předávání informací, který je realizován, sestává ze dvou částí. První je telemetrický kanál s přenosem obrazu v reálném čase, který byl vyvinut na VŠB-TUO v roce 2010 a je popsán v diplomové práci Ing. Davida Schwarze *Využití bezpilotních létajících prostředků pro telemetrické účely – telemetrický systém* [4]. Tento kanál byl převzat v původní podobě bez dodatečných úprav. Skládá se z fotoaparátu Canon PowerShot SX200 IS, vysílače a přijímače videosignálu, pracujících na frekvenci 2,4 GHz, USB karty pro digitalizaci signálu a vodičů s konektory, které propojují jednotlivé prvky. Napájení vysílače je zajištěno akumulátorem Li-Pol RAY s kapacitou 1100 mAh, fotoaparát je napájen vlastní baterií, přijímač je napájen z elektrické sítě, případně z autozásuvky. Zobrazení je zajištěno osobním počítačem pomocí programu Ulead Video Studio SE.

Druhou částí systému bude sestava senzorů od firmy Jeti Model, které jsou propojeny přes Duplex Expander k přijímači Duplex R8. Propojení s počítačem obsahujícím speciální software se provede přes terminál JetiBox ve verzi Profí. Jelikož je systém předávání dat v reálném čase ve chvíli odevzdání této bakalářské práce v koncové etapě vývoje, bude podle dohody s firmou Jeti Model odzkoušen v následujících dnech. Přitom se s uvedením na trh počítá až v dalších měsících. K realizaci budou použity s největší pravděpodobností senzory MVario, MSPEED a MUI. Bohužel nebude k dispozici senzor MGPS, u kterého se s vývojem přenosu v reálném čase stále pracuje. Příklad výstupu z obou částí systému je na Obr. 3.13.



Obr. 3.13 Příklad zobrazení dat i obrazu na obrazovce počítače [13]

4 ZÁVĚR

Koncepce UAV jako konvertoplánu má dobré předpoklady do budoucna. Spojuje výhody vrtulníku, což je především kolmý vzlet a vysokou rychlost, kterou dosahuje letoun. Elektrický pohon je taktéž díky poměrně jednoduchému a přitom velmi přesnému řízení dobrou volbou pro použití v prostředcích tohoto typu, je vhodný pro snímkování díky menším vibracím v porovnání se spalovacím motorem. Z pohledu elektronického vybavení nelze v této chvíli počítat s průlomovými objevy. Snad jenom další zdokonalování výrobních technologií jednotlivých prvků přinese snížení ceny a rozšíří výběr. Částečná realizace dokázala, že lze postavit prostředek tohoto typu s poměrně nízkými náklady, byť nesplňuje předem dané požadavky, ale potvrzuje správnost zvolené cesty. Navržený systém řízení oproti realizovanému představuje větší variabilitu a možnost rozšíření v budoucnu, proto by po odzkoušení postaveného prototypu bylo vhodné přistoupit ke stavbě navrhovaného UAV, který již splní dané požadavky.

Návrh řídicího systému dokázal, že lze využít běžně dostupné elektronické vybavení pro letecké modeláře k nekonvenčním účelům. Díky použití inovativních řešení, jako je přenos na frekvenci 2,4 GHz s oboustrannou komunikací, využití MEMS gyroskopů nebo použití řídicí jednotky lze tvrdit, že se podařilo ze stávajícího vybavení vytěžit maximum. Přitom jsou v návrhu uvedeny pouze prvky, které se již v praxi osvědčily, a proto se není třeba obávat selhání z důvodu nedopracování některé technologie.

Další rozvoj je zde nejen možný, ale je to přímo výzva pro studenty dále se zabývající touto problematikou. Stroj lze vybavit nejen kamerovým systémem, ale také chemickými sondami či systémy pracujícími mimo viditelné spektrum. Dalším vývojovým krokem by se mohl stát systém automatického řízení letu. Pro řešení těchto problémů by mohla být zavázána spolupráce s Katedrou automatizační techniky a řízení, která již v úvodu tohoto projektu projevila zájem. Studenti zmíněné katedry nyní pracují na systému automatického řízení letu pro mikrovrtulník typu X-copter se čtyřmi rotory. Jimi odzkoušená řešení by mohla být nápomocna při dalším rozvoji prostředku, jenž je předmětem této práce.

4.1 Zhodnocení cílů

Byl proveden přehled stávajících technologií dostupných k realizaci stavby UAV. Po analýze byla zvolena nejvhodnější řešení ve věci rádiových souprav, stabilizace, servomotorů, řídicích jednotek a napájení palubního vybavení. Systém byl sestaven v teoretické rovině.

Byly popsány možnosti použití telemetrie. Při částečné realizaci byla potvrzena správnost navržené koncepce v zjednodušené formě. Z pohledu řídicího systému je třeba provést změny v programovém vybavení řídicí jednotky. Byť do termínu odevzdání této práce není prostředek letuschopný a ani částečná realizace řídicího systému nebyla zcela dokončena, lze tvrdit, že po malých úpravách a doladění bude možné provést letové zkoušky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BLAŽEK, J. *Úvod do technických systémů automatického řízení a regulace*. Košice: RVS VVLŠ-SNP, 1984. 67 s.
- [2] BROŽ, V. *Modely RC vrtulníků*. Brno: Computer press, 2004, 117 s. ISBN-80-251-0105-3
- [3] GEBAUER, J. *Ovládání a řízení helikoptéry (DP)*. Ostrava: VŠB-TUO, 2010. 75 s.
- [4] SCHWARZ, D. *Využití bezpilotních létajících prostředků pro telemetrické účely – telemetrický systém (DP)*. Ostrava: VŠB-TUO, 2010. 88 s.
- [5] KLIMÁNEK, B. *Využití bezpilotních létajících prostředků pro telemetrické účely – návrh letadla (DP)*. Ostrava: VŠB-TUO, 2010. 76 s.
- [6] FIBICH, O. *Počítačový model a řízení modelářského turbínového motoru (DP)*. Praha: ČVUT, 2008. 74 s.
- [7] RENŠTEIN, M. *Přenos a zpracování signálů senzorů úhlových rychlostí (DP)*. Praha: ČVUT, 2007. 92 s.
- [8] LACHNIT, Z. *Inerciální snímače pro zlepšování odometrie mobilních robotů (BP)*. Brno: VUT, 2007. 53 s.
- [9] MAISEL, M.; GULIANETTI, D.; DUGAN, D. *The History of the XV-15 Tilt Rotor Research Aircraft: From Concept to Flight*. Washington, D.C.: NASA History Division, 2000. 222 s.
- [10] KOLMAN, L. Kolmanl.info [online][cit. 2. dubna 2011]. Dostupný z [www.: <http://www.kolmanl.info>](http://www.kolmanl.info)
- [11] United States Patents [online] [cit. 15. ledna 2011]. Dostupný z [www.: <http://www.freepatentsonline.com>](http://www.freepatentsonline.com)
- [12] Gress Aeronautics [online] [cit. 23. ledna 2011]. Dostupný z [www.: <http://www.gressaero.com>](http://www.gressaero.com)
- [13] Jeti Model s.r.o. [online] [cit. 2. dubna 2011]. Dostupný z [www.: <http://www.jetimodel.cz>](http://www.jetimodel.cz)
- [14] Freewing Flight Technologies [online] [cit. 20. března 2011]. Dostupný z [www.: <http://www.freewing.net>](http://www.freewing.net)

- [15] Bezpilotní prostředky pro civilní použití [online] [cit. 15. ledna 2011]. Dostupný z www.: <<http://lu.fme.vutbr.cz/cuav/index.htm>>
- [16] MS Composit [online] [cit. 20. března 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.mscomposit.com>>
- [17] Tech Model Products [online] [cit. 28. března 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.tech-mp.com/th-2.htm>>
- [18] Boeing: V-22 Osprey [online] [cit. 10. ledna 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.boeing.com/rotorcraft/military/v22>>
- [19] KK MultiCopter [online] [cit. 18. ledna 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.kkmulticopter.kr>>
- [20] RCM Pelikán [online] [cit. 17. února 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.rcm-pelikan.cz>>
- [21] RC Noviny – elektronika [online] [cit. 28. ledna 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.rcnoviny.cz/tag/elektronika>>
- [22] Helibeginers [online] [cit. 4. února 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.helibeginer.hu.cz>>
- [23] Modely Hořejší – Co-Pilot II [online] [cit. 15. prosince 2010]. Dostupný z www.: <<http://www.horejsi.cz/Pages/DetailProdukt.aspx?objcislo=1271>>
- [24] HobbyKing Online [online] [cit. 8. března 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.hobbyking.com>>
- [25] *RC Revue*: čísla 2/2006, 12/2009, 1/2010, 2/2010, 3/2010, 4/2010, 5/2010.
- [26] Flying Hobby Shop [online] [cit. 25. dubna 2011]. Dostupný z www.: <<http://www.flying-hobby.com>>